



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISIS SPRINGBACK PADA TUBE AISI 304L
BERPENAMPANG SEGIEMPAT PADA PROSES ROTARY DRAW
BENDING**

**CAESARIO ISAK CORNELIS
NRP. 2712 100 108**

Dosen Pembimbing
Tubagus Noor R, S.T., M.Sc
Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**SPRINGBACK ANALYSIS OF RECTANGULAR AISI 304L
TUBE IN ROTARY DRAW BENDING**

CAESARIO ISAK CORNELIS
NRP. 2712 100 108

Advisors
Tubagus Noor R, S.T., M.Sc
Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS *SPRINGBACK* PADA *TUBE AISI 304L*
BERPENAMPANG SEGIEMPAT PADA PROSES *ROTARY*
*DRAW BENDING***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

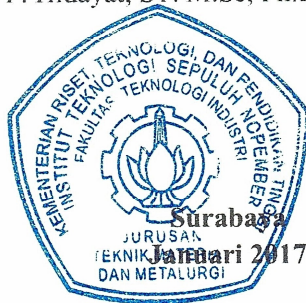
Oleh :

CAESARIO ISAK CORNELIS

NRP. 2712 100 108

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc (Pembimbing 1)
2. Mas Irfan P. Hidayat, ST. M.Sc, Ph.D (Pembimbing 2)



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

**ANALISIS SPRINGBACK PADA TUBE AISI 304L
BERPENAMPANG SEGIEMPAT PADA PROSES
ROTARY DRAW BENDING**

Nama Mahasiswa : Caesario Isak Cornelis
NRP : 2712100108
Pembimbing : Tubagus Noor R, S.T., M.Sc
: Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Rotary Draw Bending merupakan teknik yang paling umum digunakan dalam tube bending. Material AISI 304L banyak digunakan dalam tube bending untuk memenuhi kebutuhan industri otomotif dan penerbangan. Untuk mendapatkan hasil bending yang baik dan presisi dibutuhkan pengetahuan mendalam terhadap fenomena springback yang terjadi pada proses tube bending. Analisa springback dilakukan dengan Metode Elemen Hingga dengan menggunakan software ANSYS MECHANICAL APDL 17.0. Variasi pada percobaan tube bending ini berupa sudut bending, penampang tube dan ketebalan dinding tube. Diharapkan hasil permodelan ini dapat menjadi acuan untuk penelitian berikutnya. Kesimpulan yang didapat dari simulasi permodelan ini adalah sudut springback meningkat seiring bertambahnya sudut bending, sudut springback semakin kecil seiring bertambahnya ketebalan dinding tube. Pengaruh ukuran penampang tube dapat dinyatakan dengan faktor geometri atau faktor k. Semakin besar faktor k yang didapat semakin besar sudut springback yang terjadi, sebaliknya semakin kecil faktor k semakin kecil sudut springback yang terjadi.

Kata Kunci: *Rotary Draw Bending, Springback, AISI 304L, ANSYS, Metode Elemen Hingga*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SPRINGBACK ANALYSIS OF RECTANGULAR AISI 304L TUBE IN ROTARY DRAW BENDING

Name : Caesario Isak Cornelis
SRN : 2712100108
Advisors : Tubagus Noor R, S.T., M.Sc
Mas Irfan P. H, S.T., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

Rotary Draw Bending is the most common techniques used in tube bending. Material AISI 304L is widely used in tube bending to meet the needs of the automotive and aviation industries. To get a good result and precision bending, in-depth knowledge of the springback phenomenon that occurs in the tube bending process is required. Springback analysis is done by using the Finite Element Method MECHANICAL APDL ANSYS 17.0 software. Variations on this research are tube bending angle of bending, cross-section tube and tube wall thickness. Expected results of this modeling can be a reference for subsequent research. The conclusion of the simulation modeling are springback angle increases with bending angle, the smaller the springback angle with increasing thickness of the tube wall. Effect of tube cross-sectional size can be expressed by the geometry factor or factors k . The greater the factor k obtained the greater the angle of springback that occurs, otherwise the smaller the smaller the angle k factor springback happened.

Keywords: Rotary Draw Bending, Springback, AISI 304L, ANSYS, Finite Element Method

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan anugerahNya yang membuat penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun Laporan Tugas Akhir serta menyusun laporan tugas akhir yang berjudul: **“Analisis Springback Pada Tube AISI 304L Berpenampang Segiempat Pada Proses Rotary Draw Bending”** Penyusunan laporan ini merupakan salah satu tugas yang harus diselesaikan untuk meraih gelar Sarjana Teknik dan memenuhi mata kuliah Tugas Akhir.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Besar harapan penulis akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar- besarnya khususnya bagi sesama mahasiswa yang menggeluti bidang permodelan

Surabaya, Januari 2017

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
TITLE.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Permasalahan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Penelitian Sebelumnya	3
2.2. <i>Rotary Draw Bending</i>	11
2.3 <i>Strain Hardening</i>	15
2.4. <i>Springback</i>	15
2.5. <i>Springback</i> pada tube berpenampang segi empat dengan metode analitis.....	17
2.6. <i>Finite Element Method</i>	19
2.6.1 Isotropic hardening	20
2.6.2 Von Misses Yield Criterition	21
2.3.3 Bilinear Isotropic Hardening.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Metode Penelitian.....	23
3.2. Geometri Tube	24
3.3. Peralatan.....	25
3.4. Parameter modelling <i>Rotary Draw Bending</i>	26
3.5. Meshing.....	27
3.6. Proses penelitian.....	28

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Von mises stress	32
4.1.1. Tube 40 x 40 mm	32
4.1.2. Tube 40 x 30 mm	38
4.1.3. Tube 40 x 20 mm	44
4.1.4. Tube 50 x 30 mm	50
4.2. Pengaruh sudut bending terhadap <i>Springback</i>	56
4.2.1. Tube 40 x 40 mm	56
4.2.2. Tube 40 x 30 mm	60
4.2.3. Tube 40 x 20 mm	64
4.2.4. Tube 50 x 30 mm	68
4.3. Pengaruh ketebalan <i>tube</i> terhadap <i>springback</i>	72
4.4. Pengaruh ukuran penampang terhadap <i>springback</i>	75

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	79
5.2. Saran	79

DAFTAR PUSTAKA

81

LAMPIRAN

83

UCAPAN TERIMA KASIH

98

BIODATA PENULIS

99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model 3d square rotary draw bending(Zhao,2009)	5
Gambar 2.2 kurva tangential stress maksimum terhadap bending angle(Zhao,2009).....	5
Gambar 2.3 Letak titik A (Xue 2014)	6
Gambar 2.4 Kurva displacement terhadap waktu pada titik A (Xue, 2014).....	7
Gambar 2.5 sketch of springback of thin-walled tube NC bending (Gu, 2008)	10
Gambar 2.6 Alat rotary draw bending (Miller,2003).....	11
Gambar 2.7 Bend die(miller,2003)	12
Gambar 2.8 steel ball mandrel (miller,2003)	14
Gambar 2.9 Gaya pada Rotary Draw Bending (yang, 2010) .	14
Gambar 2.10 Penebalan dan Penipisan pada rotary draw bending (miller,2003).....	15
Gambar 2.11 <i>Springback</i>	16
Gambar 2.12 Fenomena springback pada grafik tegangan regangan (Callister,2007)	16
Gambar 2.13 Penampang tube berserta nilai b,h,dan t.....	18
Gambar 2.14 Proses analisis FEM.....	20
Gambar 2.15 kurva bilinear isotropic hardening (ANSYS INC, 2017).....	22
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	23
Gambar 3.2 penampang pada tube (a) ukuran 40 x 40 mm (b) ukuran 40 x 30 mm (c) ukuran 40 x 20 mm (d) ukuran 50 x 30 mm.....	25
Gambar 3.3 Model 3D Rotary draw bending.....	26
Gambar 3.4 Mesh dari alat rotary draw bending beserta tube 50 x 30 mm (a) oblique view (b) isometric view	27
Gambar 3.5 Diagram alir Finite Element Method	28

Gambar 4.1: Von mises stress pada tube 40 x 40 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	32
Gambar 4.2: Von mises stress pada tube 40 x 40 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	33
Gambar 4.3: Von mises stress pada tube 40 x 40 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	34
Gambar 4.4: Von mises stress pada tube 40 x 40 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	36
Gambar 4.5: Von mises stress pada tube 40 x 40 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	37
Gambar 4.6: Von mises stress pada tube 40 x 30 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	38
Gambar 4.7: Von mises stress pada tube 40 x 30 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	39
Gambar 4.8: Von mises stress pada tube 40 x 30 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	40
Gambar 4.9: Von mises stress pada tube 40 x 30 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	42
Gambar 4.10: Von mises stress pada tube 40 x 30 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	43
Gambar 4.11: Von mises stress pada tube 40 x 20 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	44

Gambar 4.12: Von mises stress pada tube 40 x 20 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	45
Gambar 4.13: Von mises stress pada tube 40 x 20 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	46
Gambar 4.14: Von mises stress pada tube 40 x 20 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	48
Gambar 4.15: Von mises stress pada tube 40 x 20 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	49
Gambar 4.16: Von mises stress pada tube 50 x 30 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	50
Gambar 4.17: Von mises stress pada tube 50 x 30 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	51
Gambar 4.18: Von mises stress pada tube 50 x 30 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	53
Gambar 4.19: Von mises stress pada tube 50 x 30 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	54
Gambar 4.20: Von mises stress pada tube 50 x 30 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan tooling (b) setelah pelepasan tooling.....	55
Gambar 4.21 springback pada tube 40 x 40 mm dengan berbagai sudut bending: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat	58
Gambar 4.22 Pengaruh sudut bending terhadap springback...	59
Gambar 4.23 springback pada tube 40 x 30 mm dengan berbagai sudut bending: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat	62
Gambar 4.24 Pengaruh sudut bending terhadap springback...	63

Gambar 4.25 springback pada tube 40 x 20 mm dengan berbagai sudut bending: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat.	66
Gambar 4.26 Derajat springback yang terjadi terhadap derajat bending.	67
Gambar 4.27 springback pada tube 50 x 30 mm dengan berbagai sudut bending: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat.	70
Gambar 4.28 Pengaruh sudut bending terhadap springback...	71
Gambar 4.29 Springback pada tube 40x40 mm dengan sudut bending 90 derajat dengan ketebalan: (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm	74
Gambar 4.30 Pengaruh ketebalan tube terhadap springback ..	74
Gambar 4.31 grafik pengaruh ukuran penampang terhadap springback secara (a) simulasi (b) kesimpulan.....	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>springback tube A</i>	3
Tabel 2.2 <i>Springback tube B</i>	4
Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)	24
Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L	24
Tabel 3.3 tabel parameter rotary draw bending	26
Tabel 4.1 Kondisi simulasi springback	29
Tabel 4.2 pengaruh ketebalan terhadap factor k	75
Tabel 4.3 pengaruh ukuran penampang terhadap factor k	77

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dibahas hal-hal mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan penelitian, tujuan penelitian, dan manfaat penelitian

1.1. Latar Belakang

Dalam memenuhi kebutuhan proses industri, *tube* menjadi bagian yang sangat penting. Tube-tube ini memiliki berbagai macam spesifikasi seperti bentuk tube, bentuk penampang *tube*, diameter/ukuran, ketebalan, jenis material dan lainnya. Adakalanya dibutuhkan *tube* yang tidak linear yaitu ujung *tube* antara satu dan yang lainnya tidak berada dalam satu sumbu, namun tidak diinginkan adanya sebuah sambungan. Untuk itulah dibutuhkan *bending tube* melalui proses *tube bending*. Dari berbagai macam proses *tube bending* yang paling banyak digunakan adalah *Rotary Draw Bending*. Hal ini dikarenakan proses ini cukup presisi, harga yang tidak terlalu mahal, dan proses yang tidak terlalu sulit.

Dalam pelaksanaannya proses *tube bending* ini tidak lepas dari fenomena *Springback*. Fenomena ini tak dapat dihindari dan terjadi ketika *tooling* dilepaskan. Hal ini disebabkan karena *elongation deformation* yang terjadi pada *extrados*, dan *compression deformation* yang terjadi pada *intrados* sehingga menyebabkan berkurangnya sudut *bending* dan bertambahnya radius *bending*. Masih banyak perusahaan yang masih menggunakan metode trial and error untuk mentoleransi ketidaksesuaian sudut *bending*, sehingga membuang banyak sumber daya dan waktu, oleh karena itu fenomena *springback* ini sangat menarik untuk diteliti. *Finite Element Method* digunakan untuk menganalisa fenomena *springback* ini dikarenakan *rotary draw bending* ini merupakan proses yang memiliki sifat nonlinearity dan sulit untuk dianalisis menggunakan metode lainnya (Zhao, 2009).



Tube stainless steel pada umumnya menjadi salah satu pilihan utama untuk berbagai macam aplikasi di berbagai macam industri seperti industri transportasi, kimia, oil dan gas, medical, sanitasi karena ketahanannya yang baik terhadap korosi. Untuk *tube* berbentuk segiempat penggunaannya diutamakan pada bidang arsitektural seperti proyek arsitektural, rak-rak, pegangan pada tangga, pagar dan lain sebagainya.

1.2. Rumusan masalah:

Berdasarkan penjabaran latar belakang diatas dapat ditarik beberapa masalah dalam penelitian ini yaitu:.

1. Bagaimana *springback* yang terjadi pada pemodelan *tube bending tube* AISI 304L berpenampang segiempat pada proses *rotary draw bending*?

1.3. Batasan masalah

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai dengan referensi yang ada serta agar tidak menyimpang dari permasalahan yang akan ditinjau, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan yaitu:

1. Material isotropik dan homogen.
2. Perubahan *Thermal* diabaikan.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh sudut bending terhadap sudut *springback*
2. Mengetahui pengaruh ketebalan dinding tube terhadap sudut *springback*
3. Mengetahui pengaruh ukuran penampang tube terhadap sudut *springback*

1.5. Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai referensi pengembangan dalam proses manufaktur lanjut (advanced manufacturing process) dalam dunia industri dan sebagai referensi untuk peneliti-peneliti berikutnya dalam membuat prototipe dari metode ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Dalam beberapa tahun terakhir terdapat sejumlah penelitian-penelitian mengenai *rotary draw bending* Rajpal. et al (2013) telah melakukan penelitian tentang analisis *springback Rotary draw bending* pada *tube* berpenampang lingkaran mennggunakan *finite element analysis*. Penelitian ini menggunakan *software* ABAQUS sebagai perangkat lunak. Model 3d telah dibuat dengan *bend die*, *Clamp die*, *Pressure die* dan *wiper die*. Pada penelitian ini tidak digunakan *mandrel*. *Tube* yang digunakan ada 2 jenis yaitu *Tube A* dengan Outer diameter: 50mm, Thicknes: 6mm kemudian *Tube B* dengan Outer diameter: 50mm dan Thickness : 3mm. Kedua material diatas menggunakan material yang sama yaitu ST52 NPC GRADE6 dengan spesifikasi Modulus of elasticity = 2.1×10^5 N/mm² ,Poisson's ratio = 0.3 ,Density = 9.8 g/cm³ ,Yield stress = 375.94 N/mm² ,Strength coefficient = 1.44×10^{-3} ,Strength strain coefficient = 0.51 U.T.S. = 524.57 N/mm² % Elongation = 27.1 % Modulus of rigidity= 0.790×10^5 Kemudian dari data diatas hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 *springback tube A* (Rajpal, 2013)

<i>Tube A</i>	
<i>Bending (degrees)</i>	<i>Springback(degrees)</i>
5	0.20
10	0.25
15	0.35
30	0.65
45	0.95
60	1.2
90	1.9

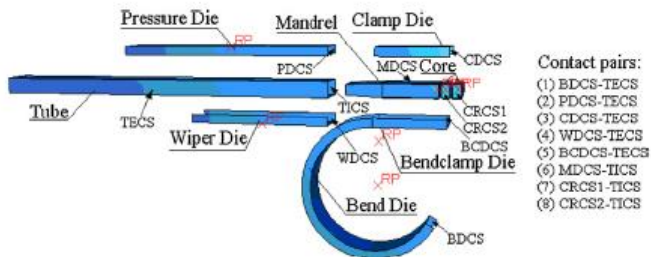


120	2.25
150	3.1
180	3.25

Tabel 2.2 *Springback tube B* (Rajpal, 2013)

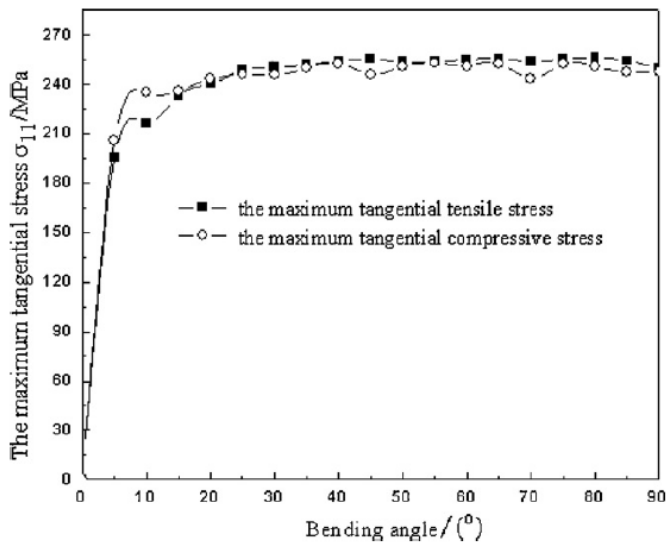
<i>Tube B</i>	
<i>Bending (degrees)</i>	<i>Springback(degrees)</i>
5	0.11
10	0.13
15	0.15
30	0.21
45	0.30
60	0.51
90	0.65
120	0.79
150	1.15

Zhao(2009) melakukan analisis FEM *tube bending* menggunakan alat *Rotary draw bending* dengan *tube* berpenampang segiempat. Yang ingin diketahui adalah maximum tangential stress yang terjadi pada *tube*. *Tube* ini memiliki 2 spesifikasi. Spesifikasi A adalah sisi luar *tube* 4x4 cm dengan ketebalan 3 mm, *bending* radius 95mm, *bending* angular velocity 0.7 rad/s dengan menggunakan mandrel. Material yang digunakan adalah Alumunium alloy A321 dengan spesifikasi yaitu elastic modulus 60.2 GPa, hardening index 0.2, Poisson's ratio 0.33 and density 2730 kg/m³. Model 3d dapat dilihat di gambar 2.2 dibawah ini:



Gambar2.1 Model 3d square rotary draw bending(Zhao,2009)

Setelah dilakukan simulasi didapatkan grafik yang dapat dilihat di gambar 2.3 dibawah ini



Gambar 2.2 kurva tangential stress maksimum terhadap *bending angle*(Zhao,2009)

Dari gambar diatas dapat disimpulkan bahwa tangential stress terus meningkat hingga *bending angle* sekitar 30 ° dan antara tangential tensile stress maksimum dengan tangential compressive stress

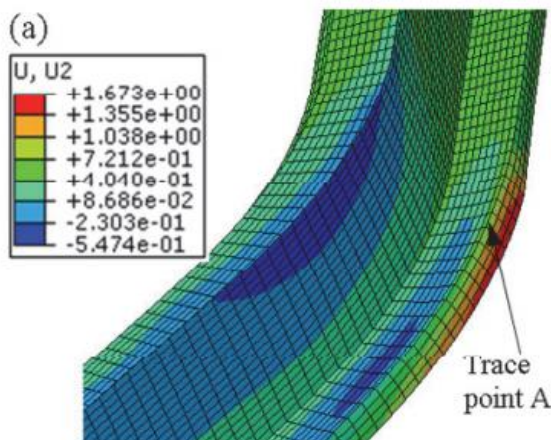


maksimum hampir sama. Xue(2014) melakukan analisis tentang twist *springback* dari asymmetric thin-walled tube dengan *rotary draw bending* process. Material yang digunakan adalah aluminium alloy(AA6060-T4) dengan ketebalan 2 mm, modulus young $E = 51\text{GPa}$, Poisson's ratio=0.33. parameter *tube bending* dapat dilihat di bawah ini:

Tabel 2.3 Parameter *tube bend* (Xue, 2014)

No.	Parameters	Values
1	Bending velocity, $\omega/(\text{rad/s})$	0.523
2	Bend angle, $\theta/(^{\circ})$	45
3	Speed of Mandrel retracted, V_m (mm/s)	100
4	Minimum bend radius, $R/(\text{mm})$	116
5	Speed of pressure die, $V_p(\text{mm/s})$	50.5
6	Clearances between tube and tools (mm)	0.1
7	Booster, P_b (MPa)	0.3
8	Wiper die rake angle, $\delta/(^{\circ})$	1
9	Mandrel flexible cores	5

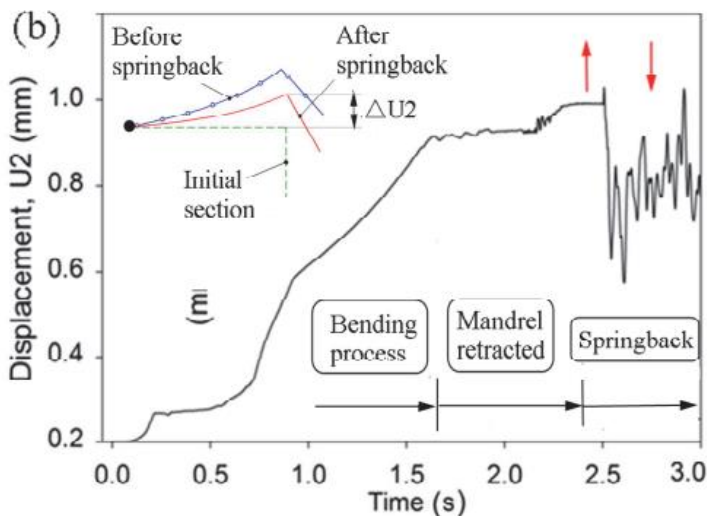
Pada proses solving diambil sebuah titik a dimana dijadikan titik yang ingin diamati untuk mengetahui displacementnya. Titik a dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 Letak titik A (Xue 2014)



Setelah dilakukan pengamatan pada titik A maka dapat dibuat kurva dari displacement yang didapat yang ditunjukkan pada gambar 2.4 dibawah ini:



Gambar 2.4 Kurva displacement terhadap waktu pada titik A (Xue, 2014)

Dengan menggunakan simulasi elemen hingga, (Murata, 2008) telah meneliti tentang *springback* pada *tube* paduan aluminium dan *tube* baja tahan karat pada proses *draw bending* dan *press bending*. Mereka menemukan bahwa pengaruh pengerasan hanya menghasilkan efek yang kecil pada *springback*. Mereka mencoba meneliti efek dari properti material yang mengalami proses pengerasan atau *hardening* pada proses *bending tube*. Penelitian dilakukan dengan melihat radius *bending*, distribusi regangan, *springback*, dan *flatness* sebagai parameter yang diteliti dengan analisa menggunakan metode elemen hingga dan hasil eksperimen pada proses *press bending*. Hasil dari penelitian ini adalah mengenai efek dari properti material *tube*, seperti *hardening exponent* n. efek dari eksponen pengerasan sudah sangat



jelas pada penelitian mengenai *bending tube*. Eksponen pengerasan dari n tidak memiliki efek terhadap fenomena *springback*, distribusi regangan ketebalan, dan rasio *flatness* pada dimensi *tube* dengan radius *bending* yang sama.

Paulsen (1996) melakukan analisa elemen hingga tiga dimensi elastis-plastis dimana focusan analisa tersebut adalah pada proses *bending* paduan aluminium. Mereka menemukan bahwa *springback* dipengaruhi oleh karakteristik dari pengerasan regangan dan jumlah dari beban aksial, termasuk penurunan pengerasan regangan dan kenaikan tegangan yang mereduksi terjadi *springback*. Fokus utama dari penelitian ini adalah efek dari sifat material, *slenderness* dari penampang, dan geometri *die* berdasarkan geometri yang ada. Pengaruh lainnya adalah dengan memberikan eksternal *pre-stretching* dan penopang internal untuk mendapatkan toleransi yang lebih baik lagi. Hasil dari penelitian sudah divalidasi dengan beberapa kali pengetesan melalui laboratorium dan juga mesin *bending* yang ada di industry. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa *wrinkles* dapat dihindari dengan mengaplikasikan *mandrel* internal dengan kondisi statis. Dan juga dapat dilihat bahwa *pre-stretching* eksternal memiliki kelebihan tersendiri untuk mereduksi terjadinya *buckling* lokal dan *springback*. *Springback* elastis dipengaruhi oleh karakteristik *strain-hardening* dan jumlah beban aksial yang diterapkan, keduanya akan menurunkan *strain hardening* dan menaikkan tegangan yang akan mereduksi kemungkinan terjadinya *springback*.

Zhan (2014) menemukan bahwa variasi Modulus Young tidak memiliki efek terhadap variasi dari sudut *springback* atau radius *springback* pada sudut *bending* dari *tube* paduan titanium. Akan tetapi, variasi tersebut mengakibatkan kenaikan nilai. Modulus Young adalah salah satu parameter penting dari suatu material yang mempengaruhi kualitas pembentukan plastis dari komponen *bent*, terutama *springback*. Modulus Young mengalami perubahan seiring dengan regangan plastis, dan karakterisasi akurat diperlukan untuk meningkatkan keakuratan simulasi pada

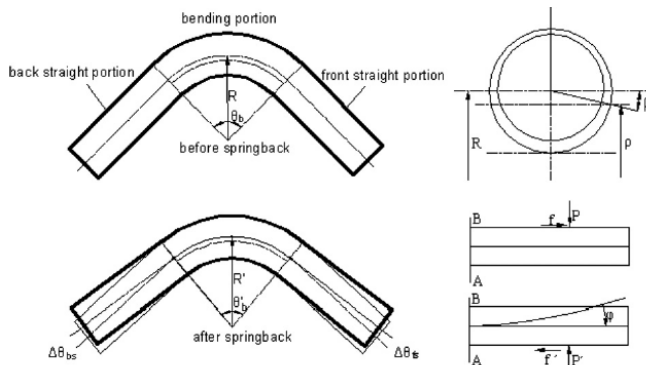


proses *bending tube* dan memperoleh *bending* dengan akurasi *bent* yang tinggi dan stabil. Efek dari variasi Modulus Young pada *springback*, *flattening* pada penampang, dan penipisan dinding material *tube* TA18-HS dengan control numeric adalah: 1) dengan adanya peningkatan regangan plastis, nilai dari Modulus Young akan berkurang secara cepat diawalnya, kemudian akan berkurang secara lambat dan akhirnya akan konstan pada nilai tertentu. Perilaku ini dapat dinyatakan sebagai fungsi eksponensial. 2) variasi Modulus Young tidak memiliki efek terhadap trend dari sudut *springback* atau radius *springback* dengan sudut *bending*, akan tetapi hal ini akan menyebabkan kenaikan nilai. 3) *flattening* dari penampang sebelum terjadi *springback* akan lebih besar dengan mempertimbangkan variasi Modulus Young dibandingkan jika variasi tersebut tidak diperhitungkan. *Flattening* dari penampang setelah terjadi *springback* akan lebih kecil dengan mempertimbangkan variasi dari Modulus Young. Dengan demikian *recovery* dari fenomena *flattening* penampang dengan mempertimbangkan variasi Modulus Young akan lebih besar jika dibandingkan dengan tidak mempertimbangkan variasi tersebut. 4) variasi dari Modulus Young memiliki efek terbatas terhadap proses penipisan dinding dari *tube*.

Gu (2008) menyusun sebuah model elemen hingga untuk proses *bending* dari *tube* dinding tipis dengan material paduan aluminium yang dikontrol secara numeric dan memperoleh efek geometri, material dan parameter proses terhadap *springback*. Hasilnya menunjukkan bahwa sudut *springback* akan meningkat seiring dengan radius *bending* dan Poisson *ratio*. Keseluruhan proses dari *bending* yang dikontrol numeric mencakup tiga proses yaitu proses *bending tube*, pengeluaran *mandrel*, dan *springback*. Berdasarkan pada simulasi numerik dari keseluruhan proses, mekaniske *springback* dan aturan *bending tube* berdinding tipis akan terlihat. Pada saat terjadi *springback*, sudut dari *bending* akan menurun dan radius dari *bending* akan meningkat. Total sudut *springback* dengan mempertimbangkan proses pengeluaran *mandrel* akan lebih kecil dibandingkan dengan tidak



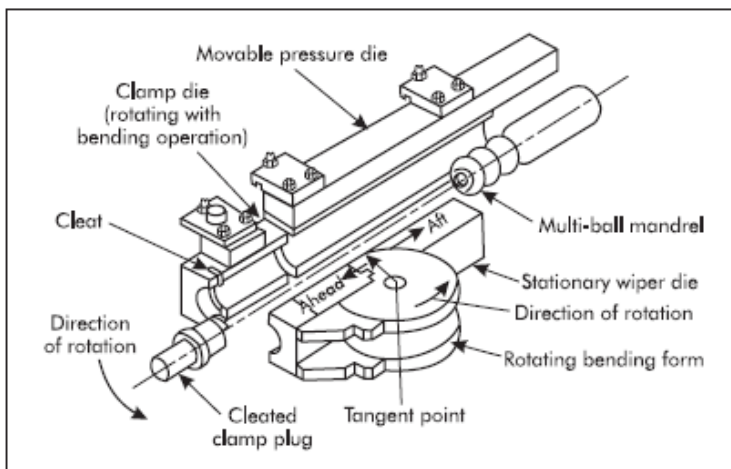
dipertimbangkannya pengeluaran mandrel dan perbedaan maksimum keduanya yang ada pada penelitian adalah 107,34%. Proses pengeluaran *mandrel* harus dipertimbangkan untuk memprediksi secara akurat *springback* yang terjadi pada *tube* berdinding tipis. Total sudut *springback* meningkatkan secara linear dengan meningkatnya sudut *bending* saat sudut *bending* tersebut besar. Radius *springback* dapat diperoleh berdasarkan panjang lapisan netral yang tidak berubah selama mekanisme *springback* berlangsung. Perubahan panjang *bending* saat *springback* berlangsung, biasanya sangat kecil sehingga dapat diabaikan ketika radius *springback* dihitung. Radius *springback* independen terhadap sudut *bending* dan peningkatan secara linear dari sudut *springback* dengan meningkatnya sudut *bending* dapat digunakan untuk menghitung radius dari *springback*.



Gambar 2.5 sketch of springback of thin-walled tube NC bending (Gu, 2008)



2.2 Rotary draw bending



Gambar 2.6 Alat rotary draw bending (Miller,2003)

Rotary draw bending merupakan metode yang paling sering digunakan pada mesin *bending* berjenis rotary yang dapat dilihat pada gambar 2.6. Alat ini dapat digerakkan secara manual maupun digerakkan secara computerized.

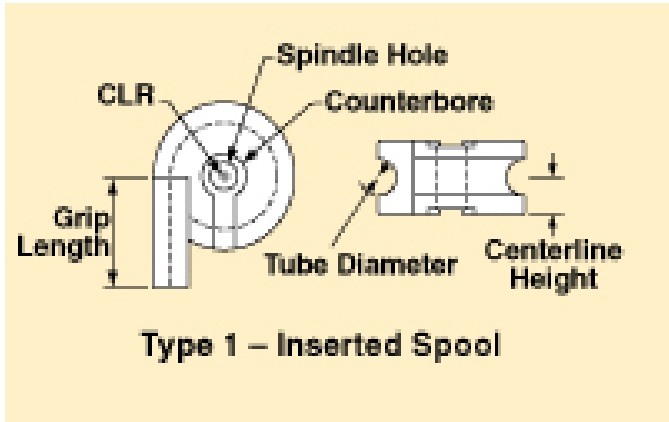
Beberapa komponen penting dalam alat *rotary draw bending* ini adalah:

1. Bend die

Merupakan bagian terpenting dari alat *rotary draw bending* karena bagian ini yang menentukan *bend* radius dari *tube*. Alur yang ada di dalam bend die ini memberikan tahanan eksternal sehingga memberikan *compressive stresses* yang menyebabkan *tube* terdeformasi. Bagian lurus dari *bend die* disebut *clamping section* yang memegang *tube* sedangkan *section* yang berlawanan bertugas menekan *tube*. Faktor yang menentukan panjang *clamping section* ini adalah ketebalan *tube*, diameter *tube*, radius bend, derajat bend, dan *yield strength* dari *tube* itu sendiri. Panjang *clamping section* ini harus mencakup seluruh *mandrel ball* yang ada, apabila



proses menggunakan *mandrel*. *Bend die* ditunjukkan oleh gambar 2.7



Gambar 2.7 Bend die(miller,2003)

2. Clamp die

Clamp die merupakan bagian yang berlawanan dengan *Clamping section* pada *bend die*. Bagian ini sangat penting karena bertugas mencegah terjadinya slip pada *tube* ketika rotasi terjadi, sehingga panjang dari clamp die ini haruslah mencukupi. Panjang dari *clamp die* ini dipengaruhi oleh diameter *tube*, ketebalan dinding, dan material.

3. Pressure die

Pressure die berfungsi untuk menjaga *tube* berada pada posisi yang tepat dan memberikan gaya reaksi pada bagian ujung yang bebas dari bidang kerja. Gaya reaksi ini yang akan membuat *bending* pada *tube* terjadi. Tekanan yang diberikan oleh *pressure die* ini harus di atur untuk menyeimbangkan tensile stress dan compressive stress dari *bending*. Pressure die ini dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

a. *Moving pressure die*



Moving pressure die ini menjadi pilihan utama dalam banyak operasi *tube bending*. *Moving pressure die* ini memiliki kelebihan yaitu dapat mengurangi gesekan karena ikut bergerak mengikuti benda kerja sehingga permukaan benda kerja dapat menjadi lebih baik.

b. *Stationary pressure die*

Pressure die ini tidak bergerak saat terjadi proses rotasi pada *bend die*. Memiliki gesekan yang lebih besar daripada *moving pressure die* namun pengaturannya lebih mudah dari pada *moving pressure die*. Biasa digunakan apabila kualitas surface dari benda kerja tidak terlalu diperhatikan. Biasanya panjang dari *stationary pressure die* ini sekitar 2-5 kali diameter luar dari *tube*.

c. *Roller type pressure die*

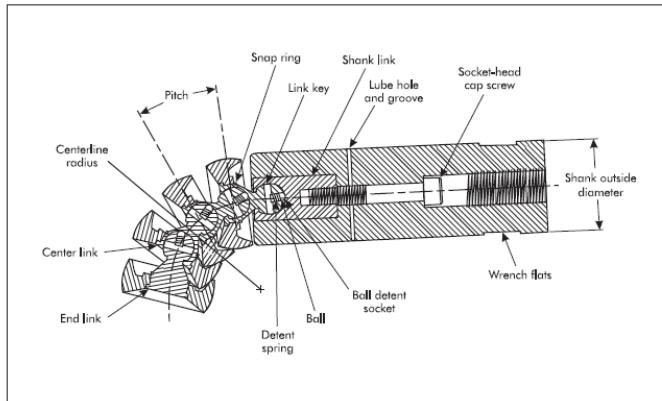
Pressure die ini berbentuk seperti *roller* yang ikut berputar ketika *bend die* berotasi. Biasanya digunakan untuk *membending tube* yang ketebalannya besar, atau radius *bending* yang sangat besar.

4. *Wiper die*

Wiper die ini berfungsi untuk membantu mencegah terjadinya *wrinkling* pada bagian dalam dari dinding *tube*.

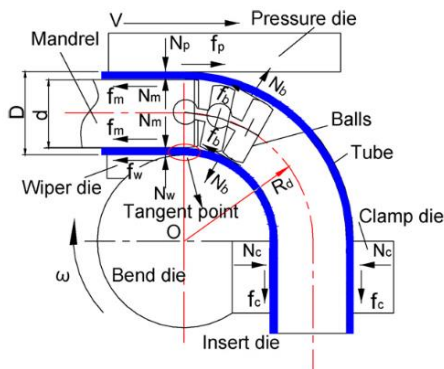
5. *Mandrel*

Mandrel adalah alat yang dimasukkan kedalam di bagian *bend tangent*. Fungsi dari *mandrel* ini ialah mencegah terjadinya *flattening* dan *wrinkling* pada *tube*. *Mandrel* ini terdiri dari berbagai macam jenis, namun yang umum digunakan untuk mendapatkan hasil maksimal adalah *steel ball mandrel*. *Steel ball* ini bisa di sambung sesuai kebutuhan. Gambar 2.8 menunjukkan *steel ball mandrel*



Gambar 2.8 steel ball mandrel (miller,2003)

Rotary draw bending ini bekerja dengan cara memegang ujung dari *tube* menggunakan kombinasi *clamping section* pada bend die serta clamp die, ketika *bend die* berotasi maka akan menarik benda kerja terhadap pressure die dan apabila dibutuhkan, *mandrel* dapat mencegah terjadi flattening pada dinding *tube*. Keterbatasan dari alat ini adalah pada peralatan standar hanya dapat melakukan *bending* hingga 180° dan ketebalan *tube* tidak boleh kurang dari 0.31mm. Gaya yang bekerja pada *proses rotary draw bending* dapat dilihat pada gambar 2.9 dibawah ini.

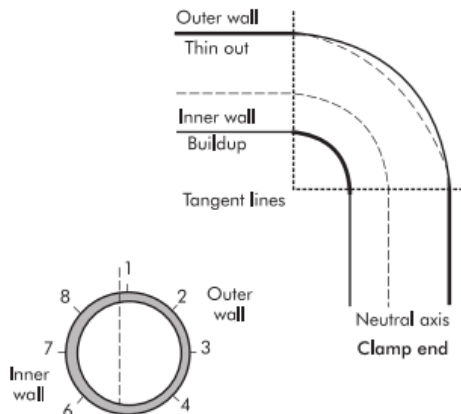


Gambar 2.9 Gaya pada Rotary Draw Bending (yang, 2010)



2.3 Strain Hardening

Proses *rotary draw bending* merupakan proses yang melibatkan deformasi plastis sehingga tidak lepas dari fenomena *strain hardening*. Pada proses ini terjadi penebalan pada bagian inner wall dari tube dan terjadi penipisan pada bagian outer tube. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.10 dibawah ini



Gambar 2.10 Penebalan dan Penipisan pada rotary draw bending (miller,2003)

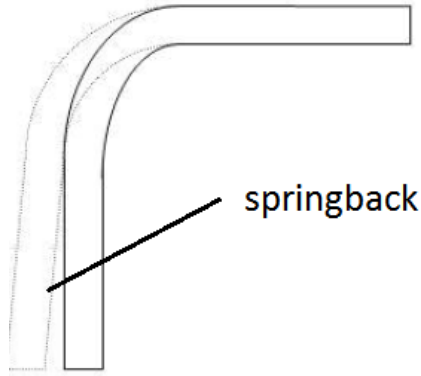
Peristiwa *strain hardening* ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk grain pada tube di berbagai daerah yang akan menyebabkan perubahan sifat mekanik terutama yield strength pada daerah tertentu. Hal ini menyebabkan *tube* kehilangan sifat *isotropic* setelah dilakukan *proses rotary draw bending*.

2.4 Springback

Fenomena pelepasan elastis yang terjadi dalam berbagai sudut ini terjadi saat *tooling* yang ada dilepas. Hal ini terjadi karena pada bagian *extrados* terjadi *elongation deformation* sedangkan pada bagian *intrados* terjadi *compression deformation*. Hal ini menyebabkan berkurangnya sudut *bending* dan bertambahnya radius *bending*. Fenomena *springback* ini mempengaruhi

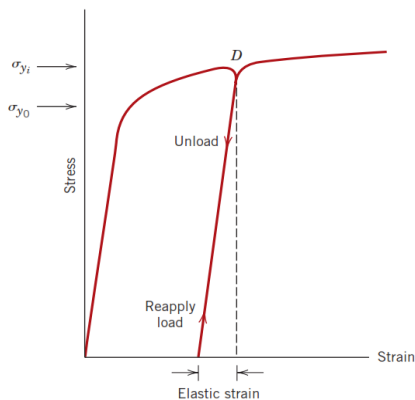


kepresisian baik secara bentuk maupun geometri dan juga menjadi penghambat dalam usaha memperoleh produk dengan kualitas *bending* yang baik, dan murah. Gambar 2.11 dibawah ini merupakan contoh dari *springback*



Gambar 2.11 *Springback*

Fenomena *springback* pada metal juga dapat dilihat pada grafik tegangan- regangan dibawah ini:



Gambar 2.12 Fenomena *springback* pada grafik tegangan regangan (Callister,2007)



2.5 Springback pada penampang segi empat dengan metode analitis

Pada saat *tooling* dilepaskan dari *tube* yang dibend, Sudut bending total akan berkurang dan radius bending akan bertambah secara bersamaan karena terjadinya fenomena *springback*. Dalam metode analitis, panjang total *bending* pada daerah deformasi dianggap sama setiap waktunya. Apabila θ_l dan R_l merupakan sudut bending dan radius bending sebelum *tooling* dilepaskan (loaded) dan θ_u dan R_u merupakan sudut bending dan radius bending ketika *tooling* dilepaskan maka panjang total bend L dapat dinyatakan:

$$L = \theta_l R_l = \theta_u R_u \quad (1)$$

Total sudut *springback* $\Delta\theta$ dapat dinyatakan dengan:

$$\Delta\theta = R_l - R_u \quad (2)$$

Perubahan *curvature* ($K = I/R$) karena terjadi pertumbuhan radial didefinisikan sebagai

$$\Delta K = K_l - K_u \quad (3)$$

Perubahan *curvature* akibat terjadinya *springback* dapat di hitung dengan memasukkan bending moment dalam persamaan sebagai berikut:

$$\Delta K = \frac{M_l}{dM/dK} \quad (4)$$

Dimana dM/dK adalah kemiringan dari hubungan antara momen dan *curvature* pada daerah elastis yang ada di persamaan berikut:

$$\frac{dM}{dK} = E \cdot I \quad (5)$$

Dimana E merupakan modulus elastisitas dan I merupakan momen inersia. Dengan memasukkan persamaan 3 dan 4 kedalam

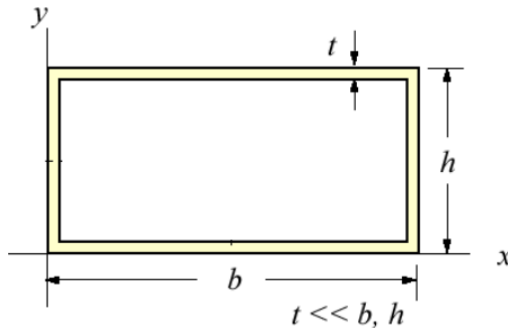


persamaan 5 maka diperoleh persamaan untuk memperoleh sudut akhir bending θ_u setelah terjadi springback yaitu:

$$\theta_u = \theta_l \left(1 - \frac{R_l M_l}{EI} \right) \quad (6)$$

Sozen. dkk (2012)

Untuk mencari momen bending dan momen inersia pada persamaan 6, maka perlu mencari nilai b, h , dan t pada penampang tube yang terdapat pada gambar 2.13:



Gambar 2.13 Penampang tube berserta nilai b, h , dan t

Momen bending pada alat rotary draw bending dengan penampang segi empat didapat melalui persamaan berikut:

$$M_l = Z \sigma_s \quad (7)$$

Dimana σ_s merupakan *yield stress* dan Z merupakan *section modulus* yang diperoleh dengan persamaan:

$$Z = \frac{bh^2}{4} - (b - 2t) \left(\frac{h}{2} - t \right)^2 \quad (8)$$

Sedangkan momen inersia dapat diperoleh melalui persamaan



$$I = \frac{1}{3}bh^2t \quad (9)$$

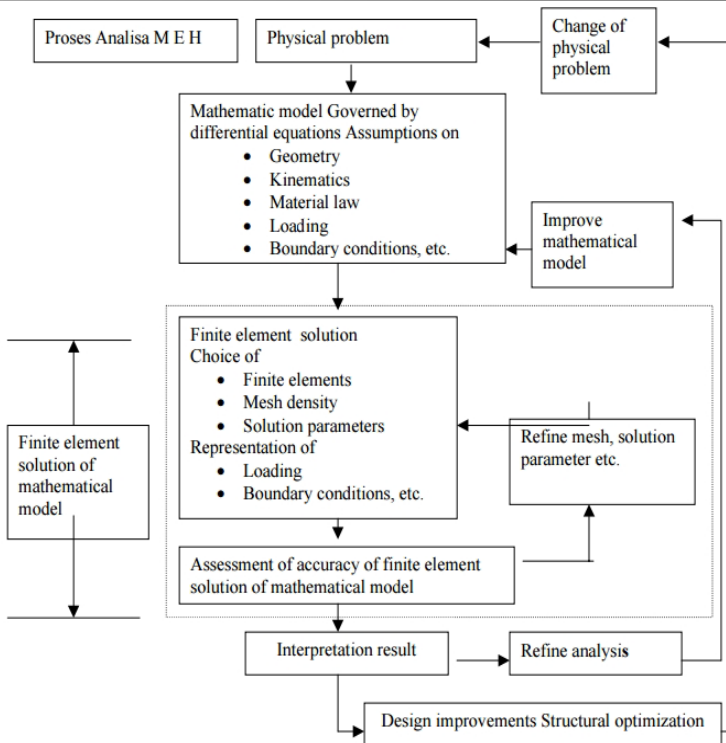
Untuk mengetahui efek perubahan geometri terhadap sudut springback maka dapat ditentukan factor k

$$k = \frac{R_l M_l}{I} \quad (10)$$

Dimana semakin besar k maka sudut springback akan semakin bertambah dan semakin kecil k maka sudut springback akan semakin berkurang.

2.6 *Finite element method*

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik berbasis komputer untuk memecahkan masalah teknik di dalam geometri bidang atau volume yang ditetapkan pengguna atau user. Geometri tersebut dibagi menjadi elemen-elemen. Setiap elemen memiliki node yang digunakan untuk mewakili nilai variable (contohnya, temperatur, tegangan dan perpindahan panas) yang membawahi elemen fungsi interpolasi (disebut juga fungsi aproksimasi). Persamaan matriks menjabarkan sifat-sifat setiap elemen. Hal tersebut ditentukan dengan menggunakan salah satu dari tiga pendekatan, yaitu; pendekatan langsung, pendekatan variasional, atau pendekatan weighted residual. Setiap persamaan matriks digabungkan untuk menemukan persamaan sistem secara keseluruhan. Nilai nodal dari variabel lapangan dimasukkan pada persamaan sistem. Nilai nodal yang tidak diketahui dari masalah akan diperoleh dengan menyelesaikan persamaan sistem. Masalah teknik yang umum ditangani oleh Metode Elemen Hingga antara lain adalah: struktural, termal, aliran fluida, listrik, magnet, kebisingan akustik dan lain - lain. Di dalam proses *bending tube* ini akan melibatkan masalah struktural.



Gambar 2.14 Proses analisis FEM

2.6.1 Isotropic hardening

Ada 2 jenis permodelan hardening yang dapat dijalankan pada program ANSYS yaitu isotropic hardening dan kinematic hardening. Pada permodelan tugas akhir ini digunakan metode isotropic hardening sehingga baushinger effect dapat diabaikan. Pada saat deformasi plastis terjadi, isotropic hardening menyebabkan penambahan dari yield surface secara seragam. Sehingga akan meningkatkan yield stress. Bentuk dari yield criterionnya adalah :

$$F(\sigma) - \sigma_y(\xi) = 0$$



Dimana $F(\sigma)$ merupakan fungsi scalar dari tegangan dan $\sigma_y(\xi)$ Merupakan yield stress yang berevolusi sebagai fungsi dari serangkaian internal variable dari material (ξ). (ANSYS INC, 2017)

2.6.2 Von Misses Yield Criterition

Von misses yield criterion biasa digunakan pada permodelan plastisitas untuk berbagai jenis material. Dimana von misses ini adalah:

$$f(\sigma, \sigma_y) = \sigma_e - \sigma_y = 0$$

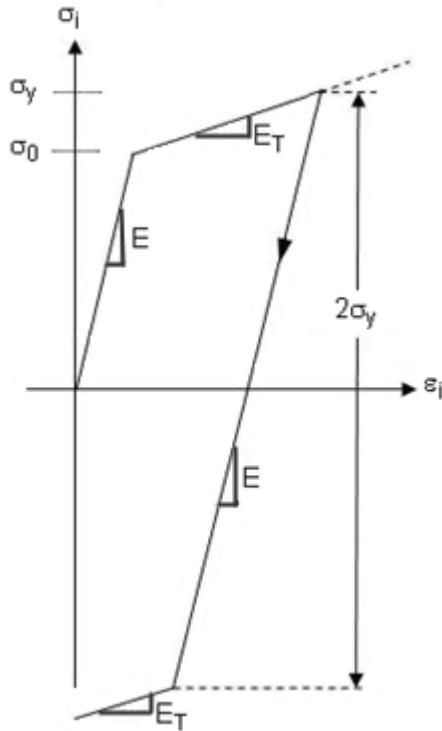
Dimana σ_e adalah Von Misses Effective stress, atau biasa disebut Von Misses equivalent stress,

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\sigma : \sigma - \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma)^2 \right)}$$

Dan σ_y adalah yield stress yang didapat dari pembebanan uniaxial. (ANSYS INC, 2017)

2.3.3 Bilinear Isotropic Hardening

Bilinear isotropic hardening dapat dideskripsikan sebagai kurva stress strain menggunakan modulus elastisitas (E) dan tangent modulus (E_T). Slope awal dari kurva digambarkan dengan modulus elastisitas, setelah melewati yield stress (σ_s) regangan plastis terjadi tegangan vs total regangan terus terjadi dan dinyatakan dengan slope yang didefinisikan sebagai tangent modulus (E_T) yang diinput. Tangent modulus tidak boleh bernilai negative atau lebih besar dari modulus elastisitas. Gambar 2.15 menunjukkan kurva *bilinear isotropic hardening* (ANSYS INC, 2017)

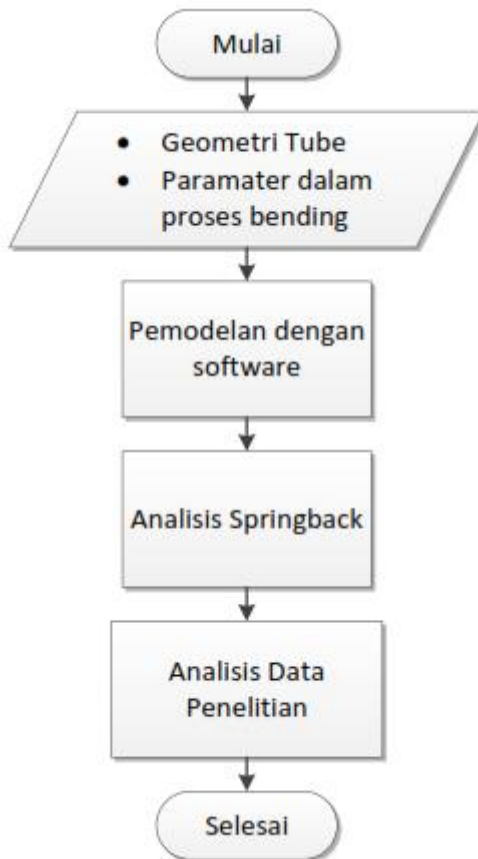


Gambar 2.15 kurva *bilinear isotropic hardening* (ANSYS INC, 2017)

BAB III METODOLOGI

Dalam bab III ini akan dibahas mengenai metode yang digunakan dalam penelitian, spesifikasi material *tube*, Dan permodelan yang dilakukan menggunakan *software*.

3.1 Metode penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



Pada penelitian ini, material yang digunakan dalam proses *bending* adalah *stainless steel* AISI 304L. Data-data properti material yang didapat berasal dari data base Matweb, North American Stainless dengan standar UNS S30430, EN 1.4307 dan ASM Handbook Vol 1. Untuk komposisi AISI 304L dapat dilihat pada tabel 3.1 sedangkan untuk properti materialnya disajikan pada tabel 3.2

Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)

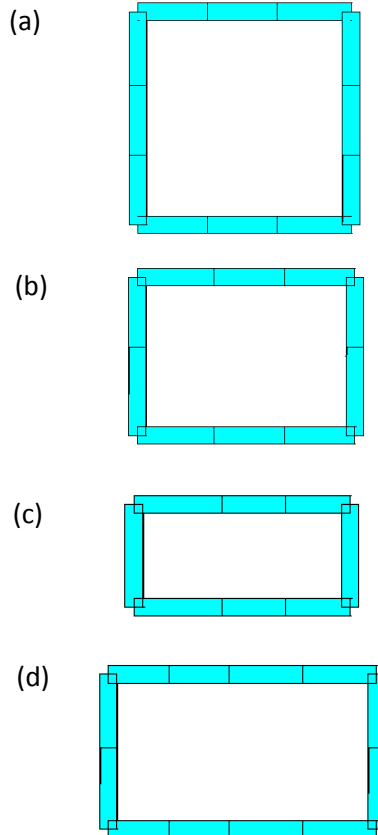
Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Min						18.00	8.00
Max	0.03	2.0	0.045	0.030	1.00	20.00	12.00

Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L

Material	AISI 304L
Modulus young(Gpa)	210
Tangent Modulus (Gpa)	1.4936
Poisson Ratio	0.3
Yield Stress (Mpa)	210
Density (Kg/m ³)	7850

3.2 Geometri Tube

Tube yang digunakan dalam simulasi adalah tube dengan penampang segi empat. *Tube* ini memiliki 4 ukuran penampang , yaitu ukuran 40 x 40 mm , 40 x 30 mm , 40 x 20 mm dan 50 x 30 mm. gambar penampang *tube* dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini



Gambar 3.2 penampang pada *tube* (a) ukuran 40 x 40 mm (b) ukuran 40 x 30 mm (c) ukuran 40 x 20 mm (d) ukuran 50 x 30 mm

3.3 Peralatan

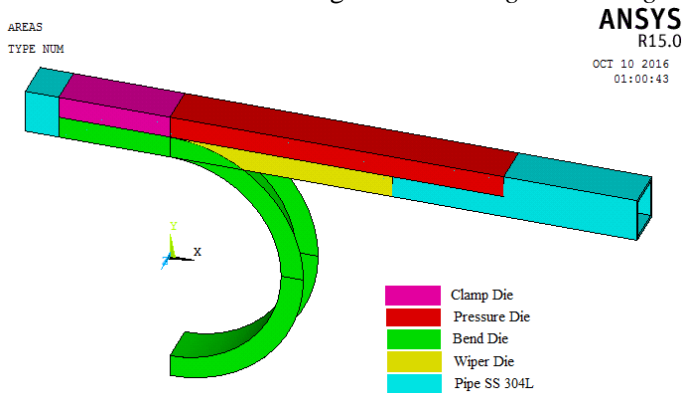
Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis elemen hingga yaitu ANSYS dengan modul *Mechanical APDL Release 17.0* yang digunakan



untuk membuat pemodelan geometri dan memodelkan simulasi *Rotary Draw Bending*.

3.4 Parameter Modelling *Rotary Draw Bending*

Pada penelitian ini menggunakan alat *Rotary Draw Bending* serta *tooling* yang lengkap yaitu *bend die*, *clamp die*, *pressure die*. *Internal Pressure* digunakan sebagai pengganti *mandrel* pada *case 1* hingga *case 20*. *Shell 181* digunakan untuk melakukan *meshing* pada *tube*, dan *contact* antara *tube* dengan *die* digunakan *standard contact* dengan metode *Augmented Lagrange*



Gambar 3.3 Model 3D *Rotary draw bending*

Parameter yang digunakan adalah:

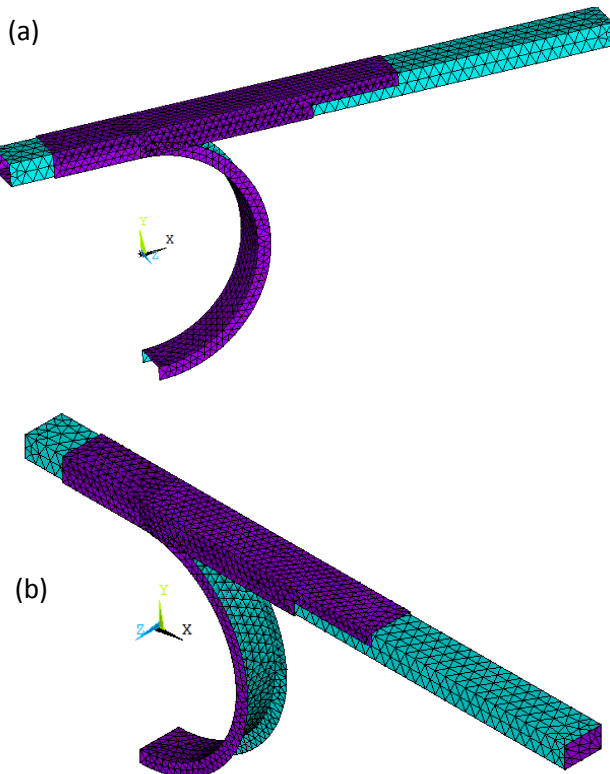
Tabel 3.3 tabel parameter *rotary draw bending*

<i>Internal Pressure</i>	5 Mpa
<i>Friction Coefficient (u)</i>	
- <i>Pressure Die/tube</i>	0.2
- <i>Clamp Die/tube</i>	0.2
- <i>Others</i>	0.2
<i>Bending Radius</i>	140 mm



3.5 Meshing

Meshing yang digunakan pada permodelan ini menggunakan metode *free mesh* dengan elemen segitiga dan *smartsize* 3. Elemen segitiga dipilih karena mempermudah memperoleh konvergensi namun diperlukan *meshing* dengan ukuran yang cukup *fine*. Gambar 3.4 dibawah merupakan gambar hasil *mesh* pada proses *Rotary Draw Bending*.

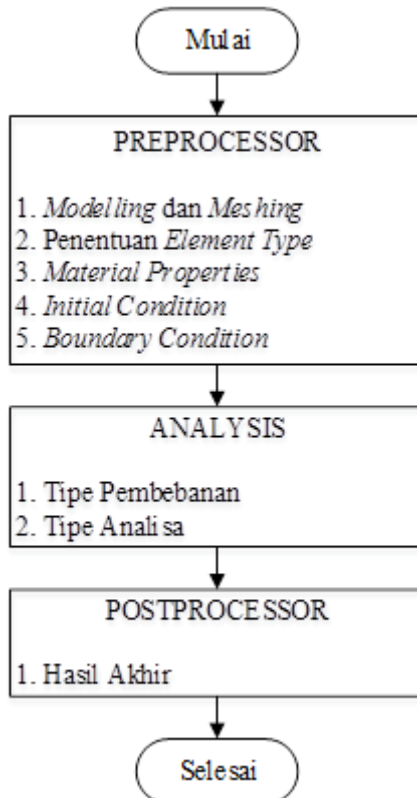


Gambar 3.4 Mesh dari alat *rotary draw bending* beserta tube 50 x 30 mm (a) *oblique view* (b) *isometric view*



3.6 Proses Penelitian

Adapun diagram alir pemodelan *bending* pada *tube* dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 15.0 dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram alir Finite Element Method

Ada sebanyak 23 *case* pada simulasi dengan beberapa variasi pembebanan yang dapat dilihat pada table 3.4 dibawah ini

**Tabel 3.4** Percobaan simulasi beserta pembebanan

<i>Case</i>	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Ketebalan (mm)	Internal Pressure (Mpa)	Sudut Bending (°)
1	40	40	3	5	30
2	40	40	3	5	60
3	40	40	3	5	90
4	40	40	3	5	120
5	40	40	3	5	180
6	40	20	3	5	30
7	40	20	3	5	60
8	40	20	3	5	90
9	40	20	3	5	120
10	40	20	3	5	180
11	40	30	3	5	30
12	40	30	3	5	60
13	40	30	3	5	90
14	40	30	3	5	120
15	40	30	3	5	180
16	50	30	3	5	30
17	50	30	3	5	60
18	50	30	3	5	90
19	50	30	3	5	120
20	50	30	3	5	180
21	40	40	1	0	90
22	40	40	2	0	90
23	40	40	3	0	90



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa simulasi dengan metode elemen hingga mengenai *springback* pada *tube* telah dilakukan dengan berbagai kondisi yang berbeda yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kondisi simulasi *springback*

<i>Case</i>	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Ketebalan (mm)	Internal Pressurre (Mpa)	Sudut <i>Bending</i> (°)
1	40	40	3	5	30
2	40	40	3	5	60
3	40	40	3	5	90
4	40	40	3	5	120
5	40	40	3	5	180
6	40	20	3	5	30
7	40	20	3	5	60
8	40	20	3	5	90
9	40	20	3	5	120
10	40	20	3	5	180
11	40	30	3	5	30
12	40	30	3	5	60
13	40	30	3	5	90
14	40	30	3	5	120
15	40	30	3	5	180
16	50	30	3	5	30
17	50	30	3	5	60
18	50	30	3	5	90
19	50	30	3	5	120
20	50	30	3	5	180



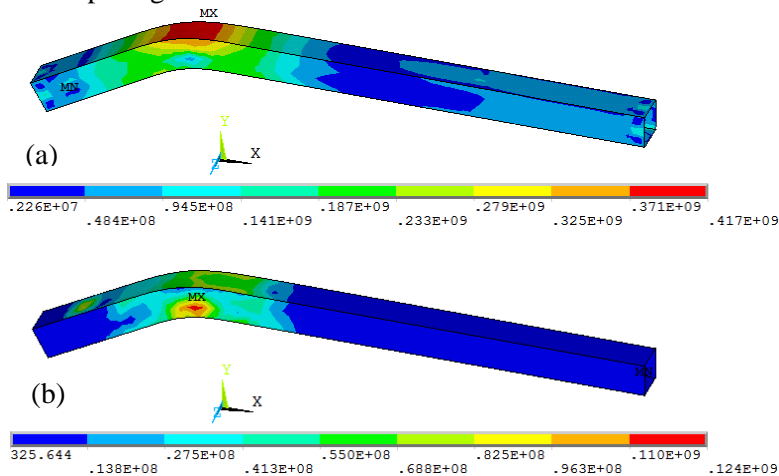
21	40	40	1	0	90
22	40	40	2	0	90
23	40	40	3	0	90

Pada proses *rotary draw bending* ini, *case 1* hingga *case 20* akan dianalisa mengenai pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback*, serta pengaruh ukuran penampang terhadap sudut *springback*, dan *case 21* hingga *case 23* akan dianalisa pengaruh ketebalan pipe terhadap sudut *bending*.

4.1 Von mises stress

4.1.1 Tube 40x40 mm

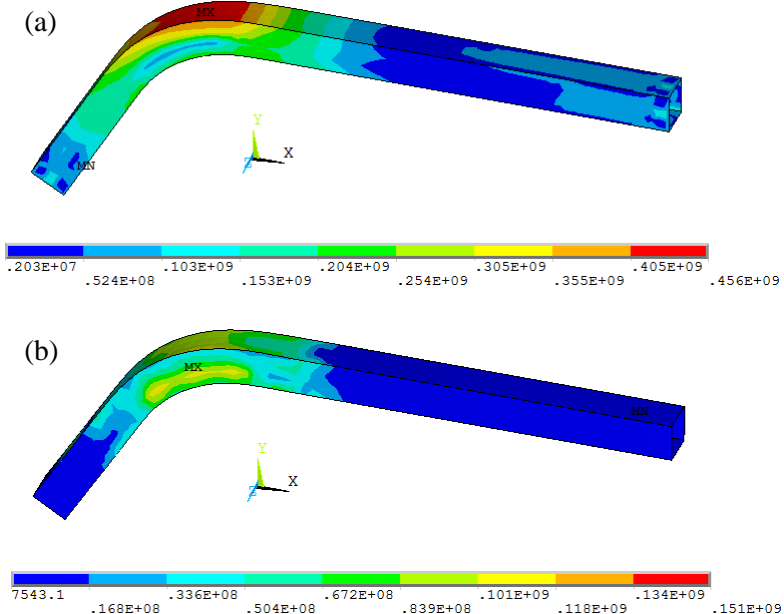
Gambar von mises *stress* pada tube 40 x 40 mm dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.1: Von mises *stress* pada tube 40 x 40 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



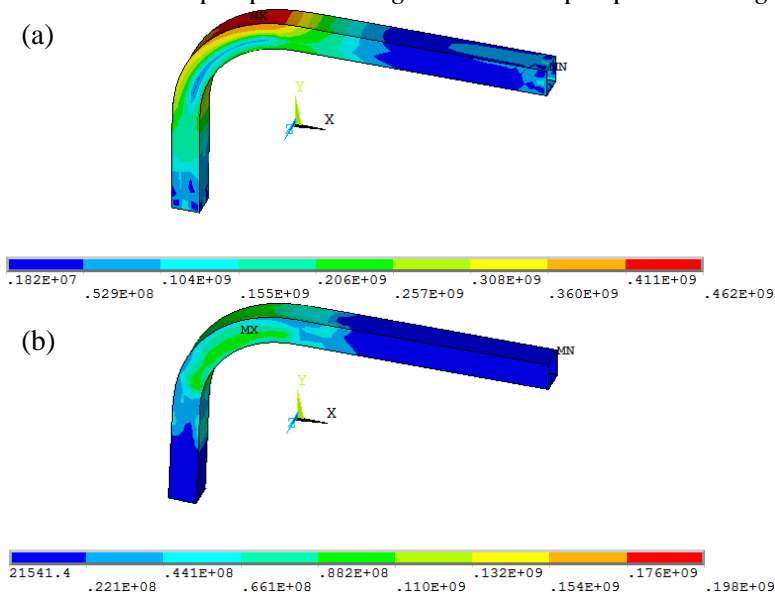
Gambar 4.1 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan sudut bending 30 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 417 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 124 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.



Gambar 4.2: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



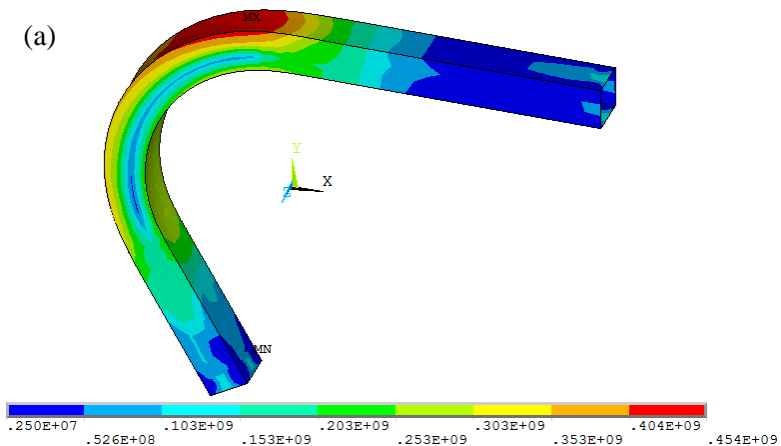
Gambar 4.2 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan sudut bending 60 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 456 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 151 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

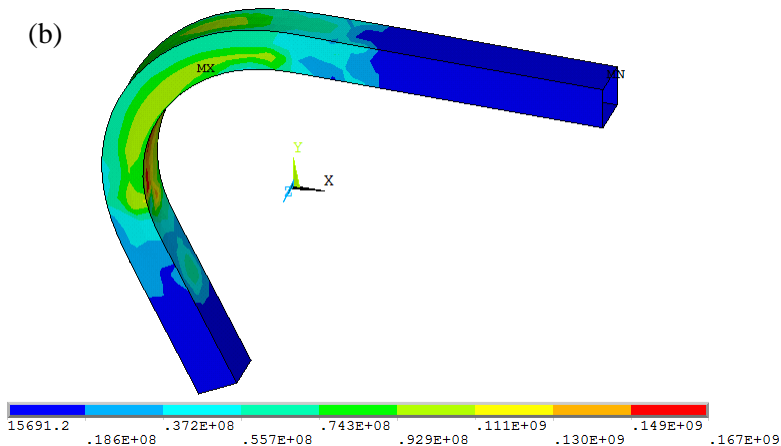


Gambar 4.3: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



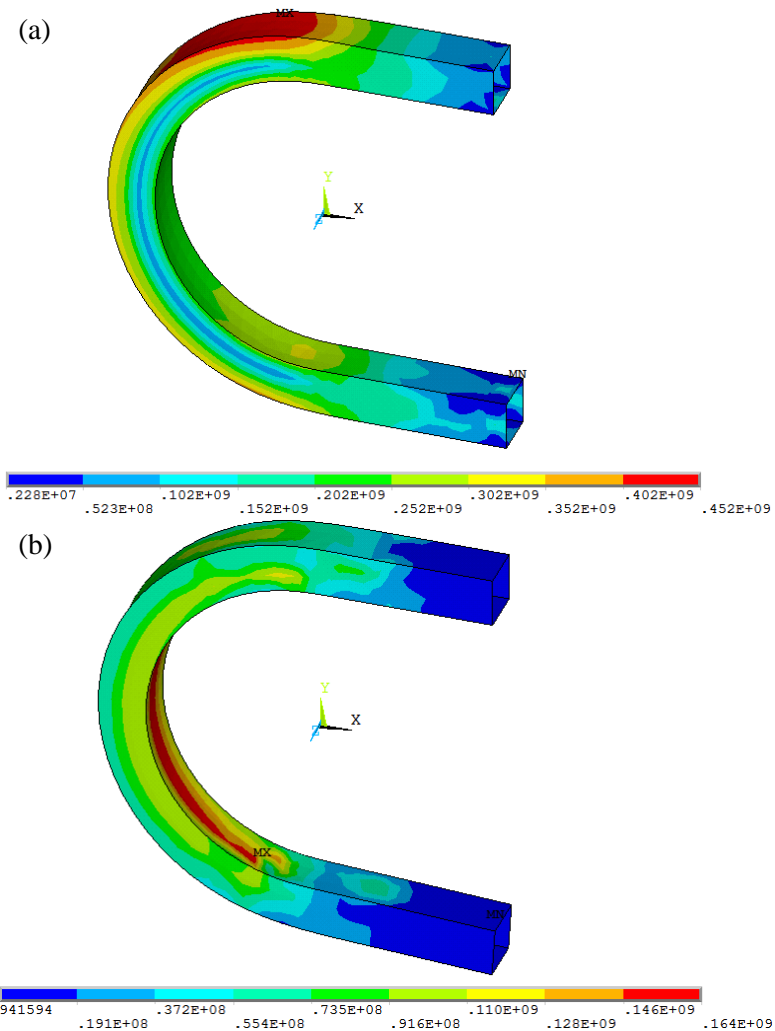
Gambar 4.3 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan sudut bending 90 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 462 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 198 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.





Gambar 4.4: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.4 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan sudut bending 90 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von misses *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 454 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 167 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.



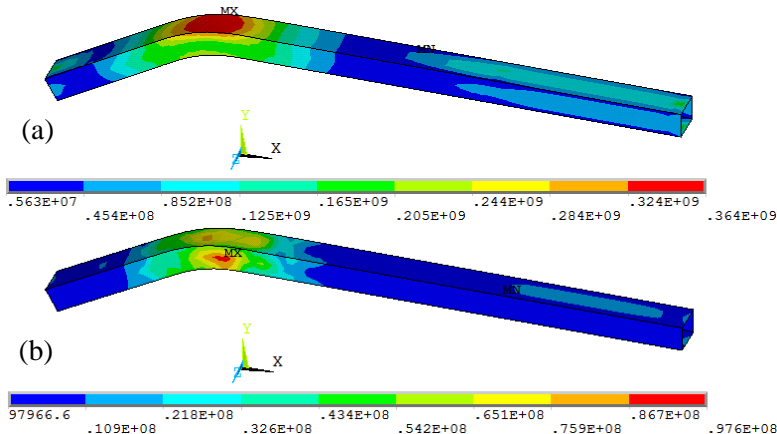
Gambar 4.5: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



Gambar 4.5 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 40 mm dengan sudut bending 90 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 452 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 164 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

4.1.2 *Tube* 40x30 mm

Gambar von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

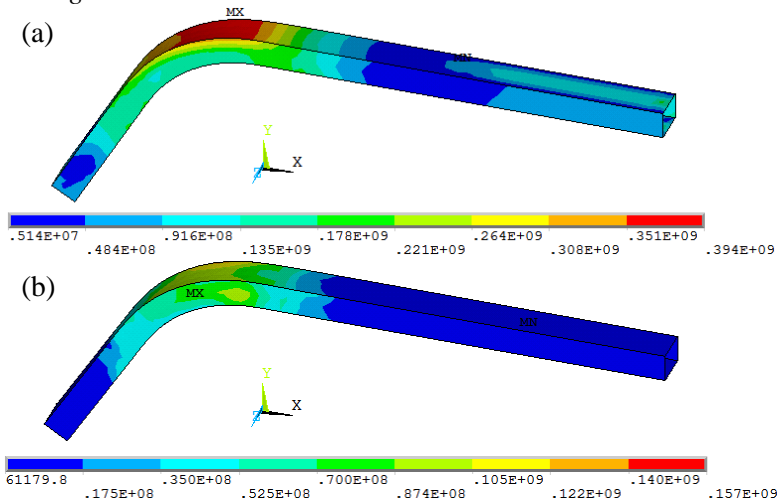


Gambar 4.6: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.6 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan sudut bending 30 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von



mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 364 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 97.6 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

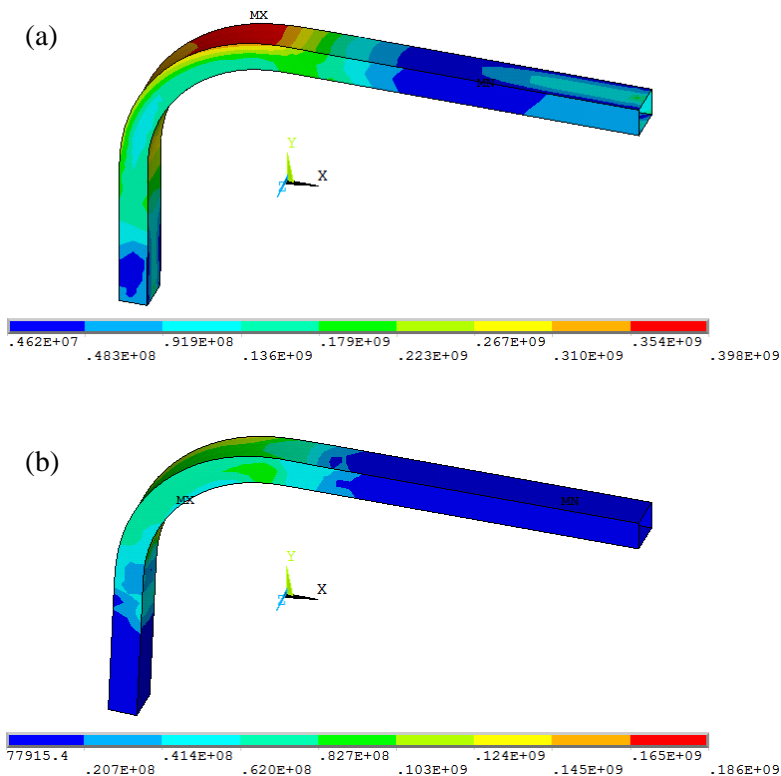


Gambar 4.7: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.7 diatas merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan sudut bending 60 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat



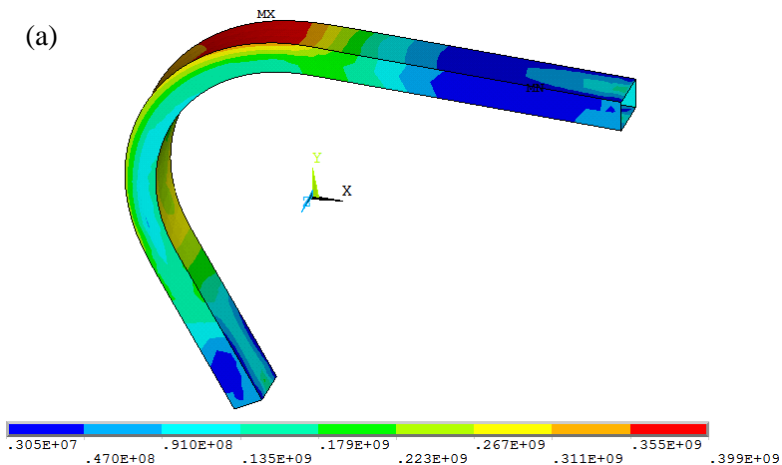
kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 394 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 157 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

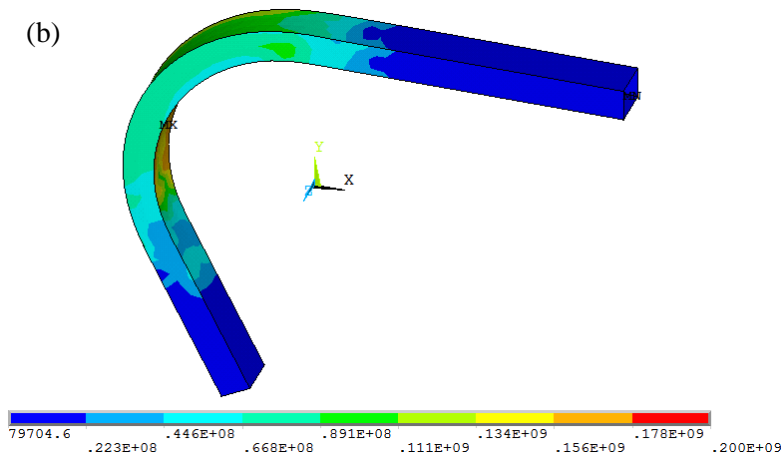


Gambar 4.8: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



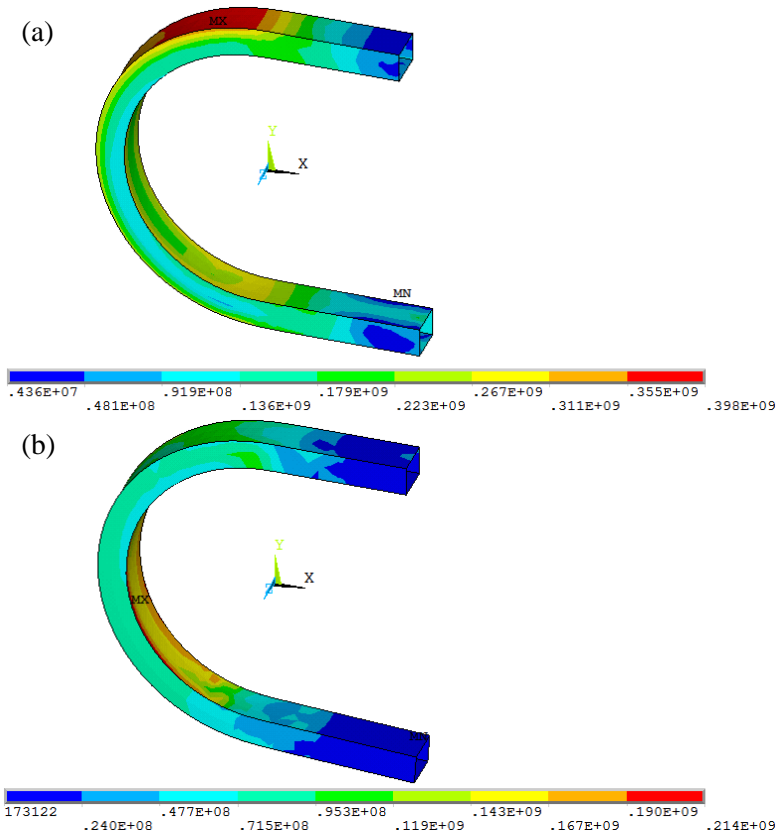
Gambar 4.8 diatas merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan sudut bending 90 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 398 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 186 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.





Gambar 4.9: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.9 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan sudut bending 120 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 399 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 200 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.



Gambar 4.10: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

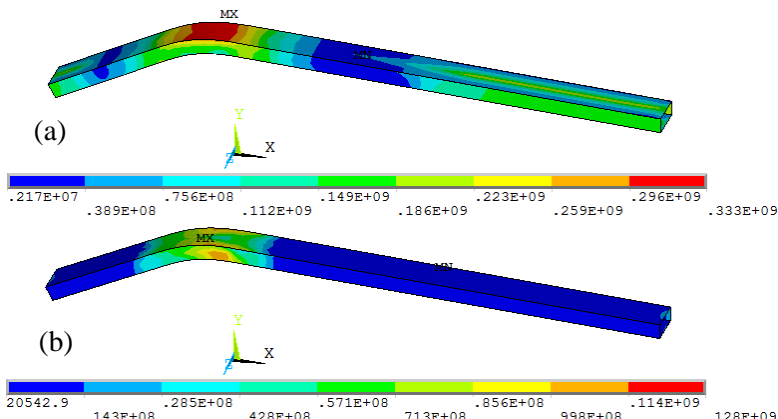
Gambar 4.10 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 30 mm dengan sudut bending 120 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von misses *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 398 Mpa. Pada saat



pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 214 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

4.1.3 *Tube* 40x20 mm

Gambar von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dapat dilihat pada gambar dibawah ini:

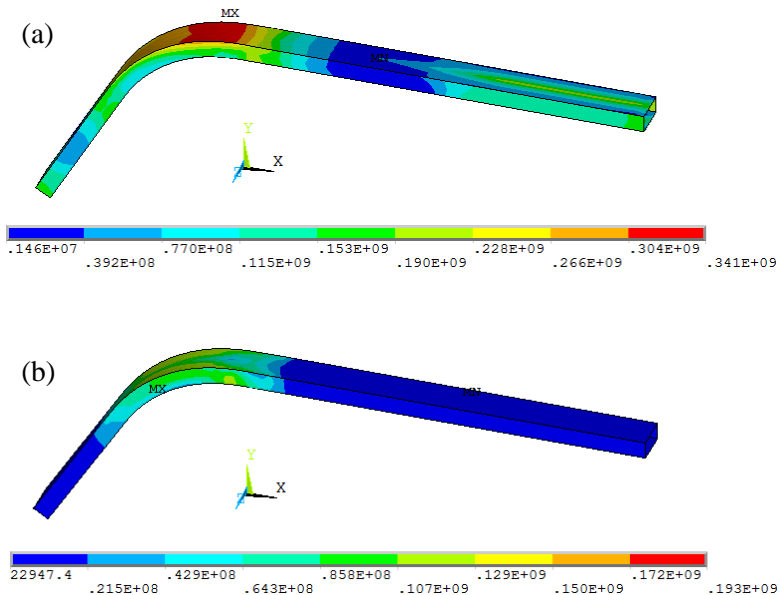


Gambar 4.11: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.11 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan sudut bending 30 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 333 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 128 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah



dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

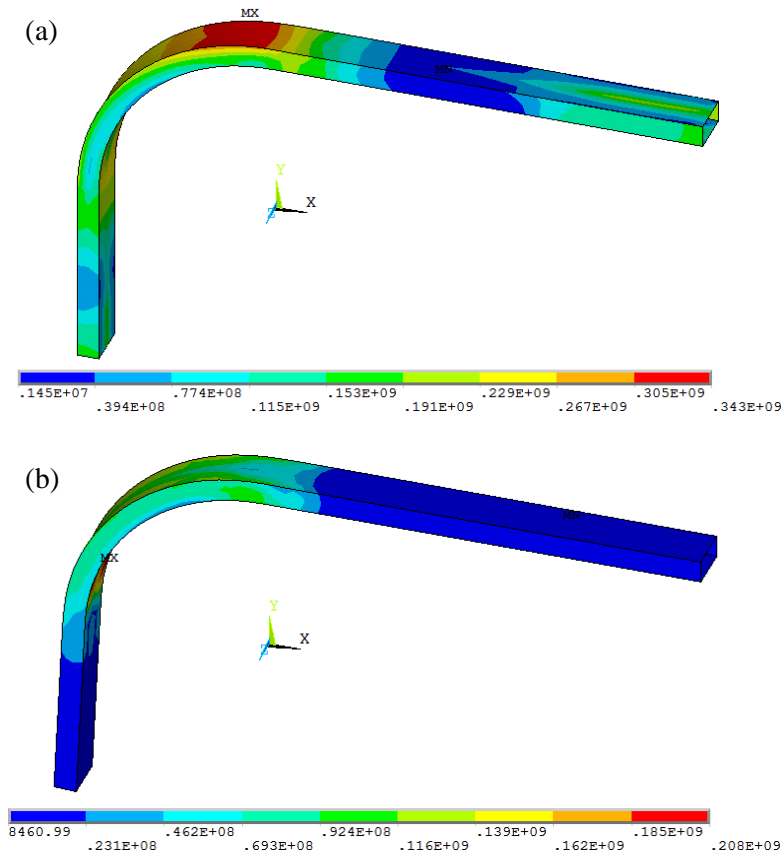


Gambar 4.12: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.12 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan sudut bending 60 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von misses *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 341 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 193 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan



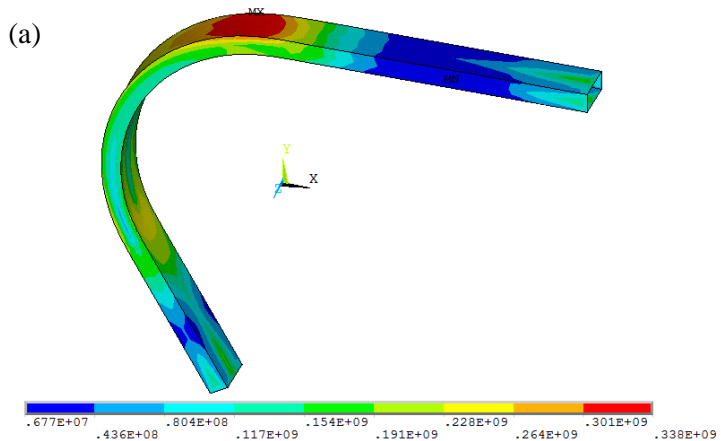
pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

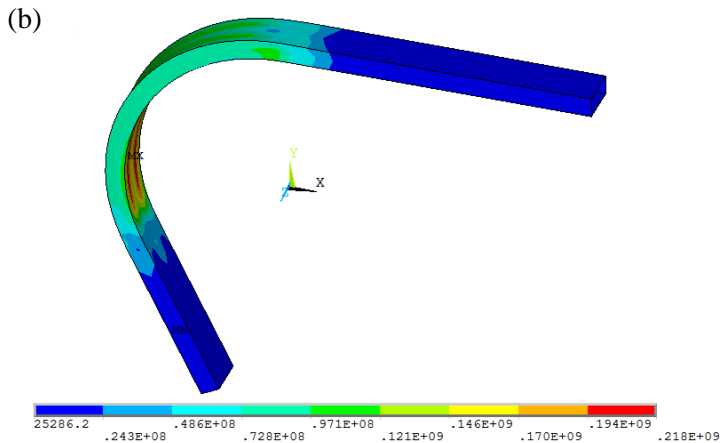


Gambar 4.13: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



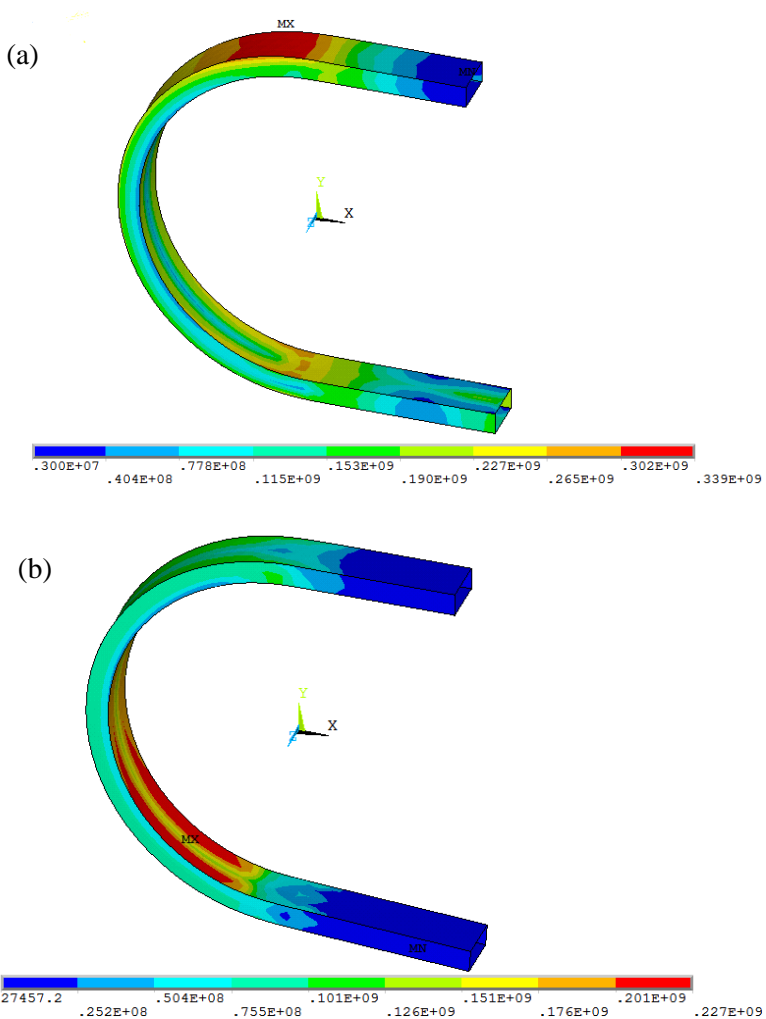
Gambar 4.13 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan sudut bending 90 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 343 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 208 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.





Gambar 4.14: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.14 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan sudut bending 120 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von misses *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 338 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 218 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.



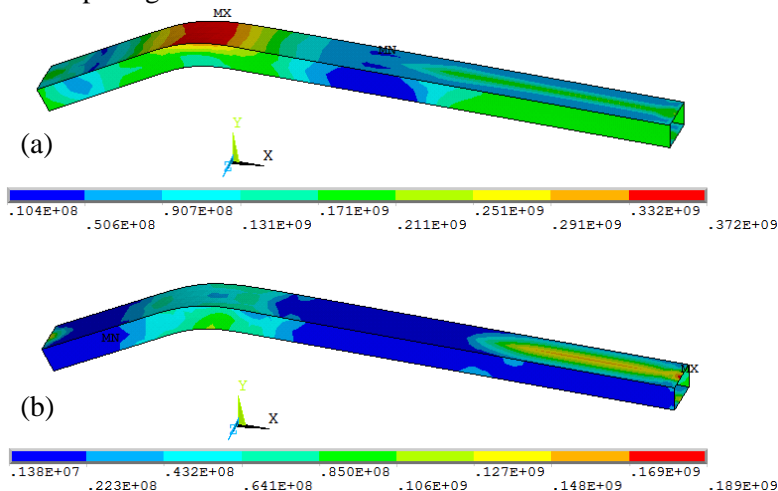
Gambar 4.15: Von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



Gambar 4.15 merupakan von mises *stress* pada *tube* 40 x 20 mm dengan sudut bending 180 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 339 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 227 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

4.1.4 *Tube* 50x30 mm

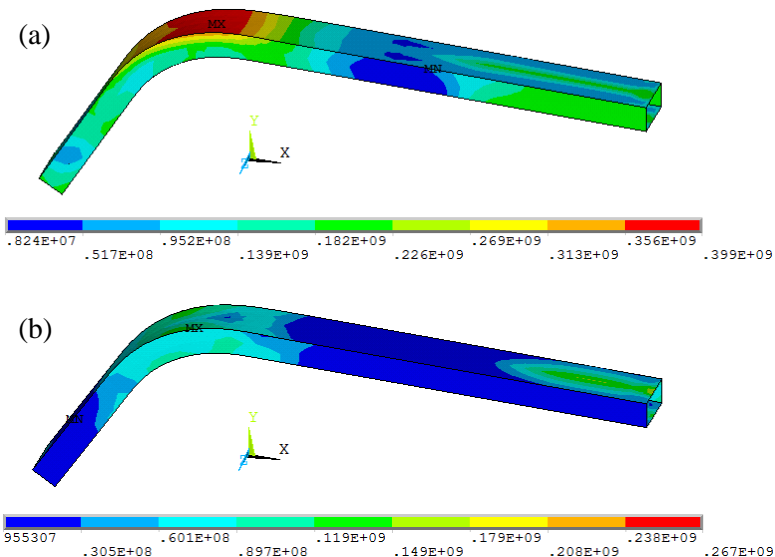
Gambar von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.16: Von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan bending angle 30 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



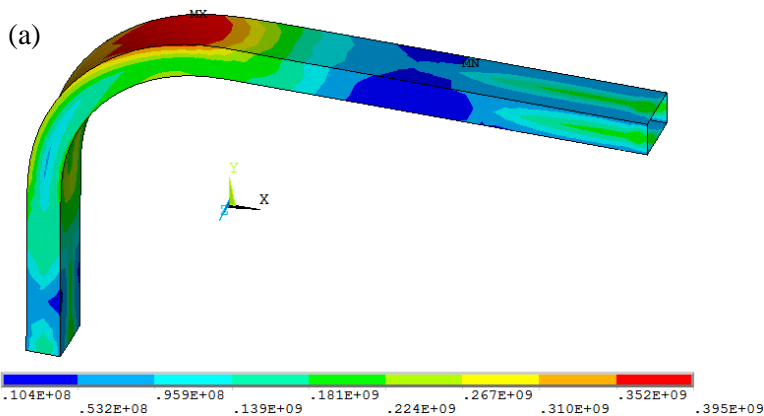
Gambar 4.16 merupakan von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan sudut bending 30 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 372 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 189 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

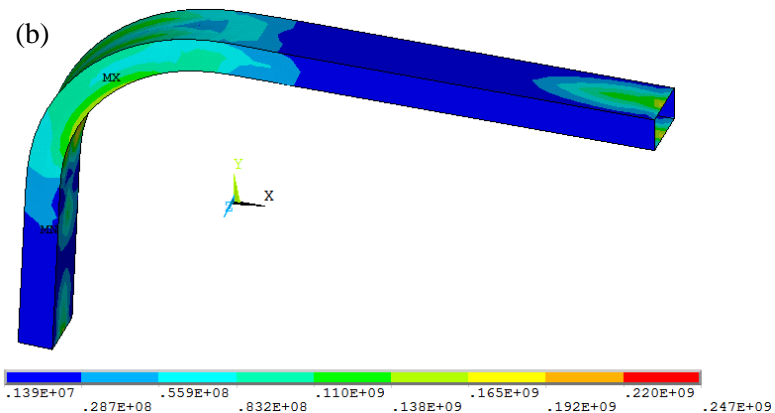


Gambar 4.17: Von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan bending angle 60 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.



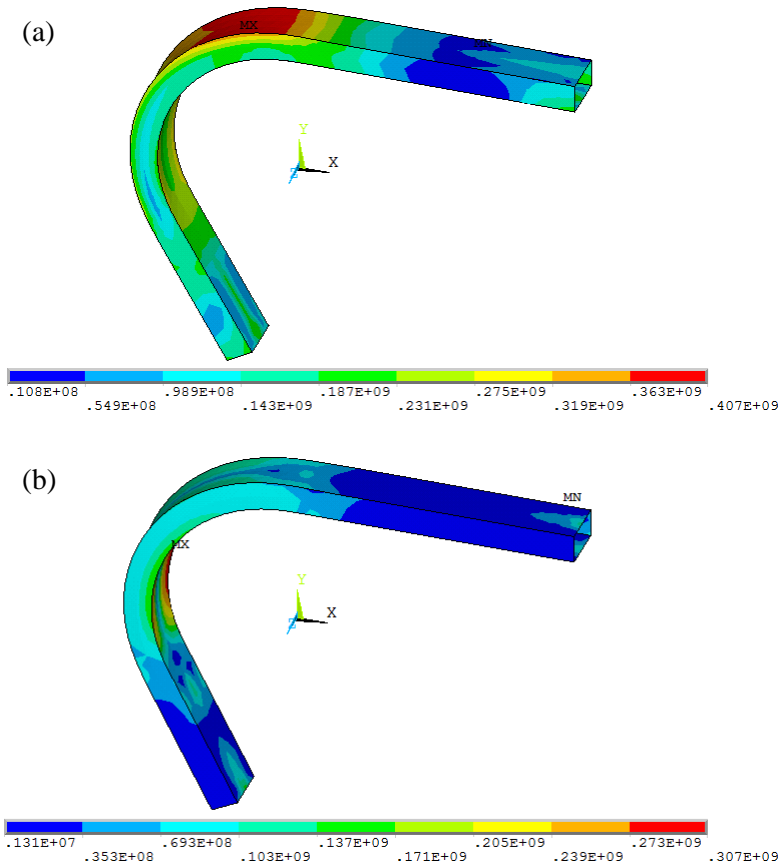
Gambar 4.17 merupakan von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan sudut bending 60 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 399 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 267 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.





Gambar 4.18: Von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan bending angle 90 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.18 merupakan von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan sudut bending 90 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von misses *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 395 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 247 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

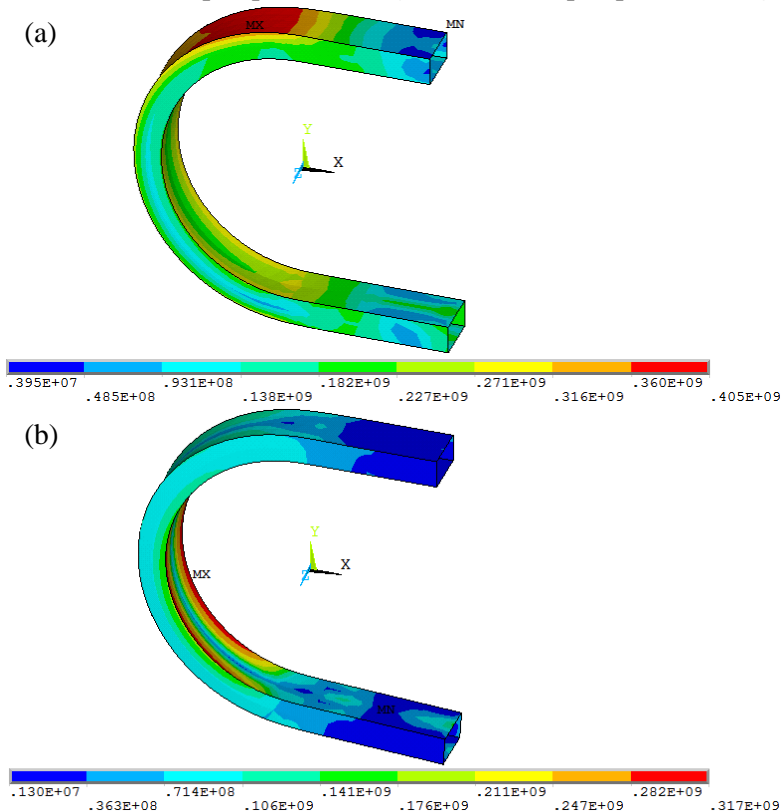


Gambar 4.19: Von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan bending angle 120 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

Gambar 4.19 merupakan von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan sudut bending 120 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von misses *stress* pada saat



kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 407 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 307 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.



Gambar 4.20: Von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan bending angle 180 derajat (a) sebelum pelepasan *tooling* (b) setelah pelepasan *tooling*.

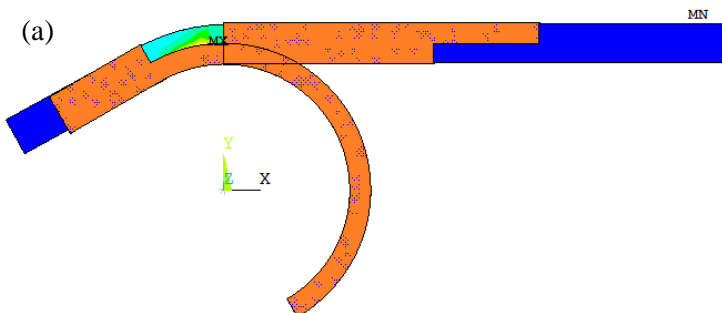


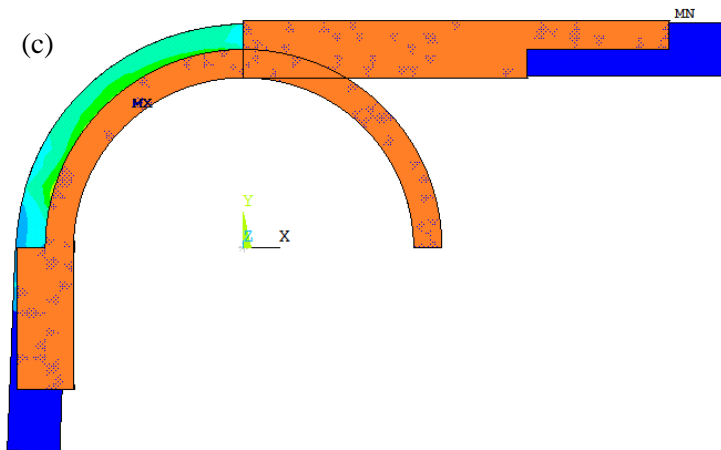
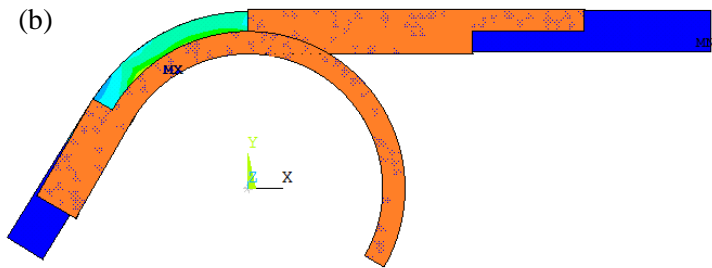
Gambar 4.20 merupakan von mises *stress* pada *tube* 50 x 30 mm dengan sudut bending 180 derajat. Dapat dilihat pada gambar diatas pada kondisi sebelum pelepasan *tooling* nilai von mises *stress* tertinggi ditunjukkan pada daerah yang berwarna merah. Daerah ini berada pada bagian awal terjadinya bending (tangential area). Nilai maksimum dari von mises *stress* pada saat kondisi sebelum pelepasan *tooling* yaitu 405 Mpa. Pada saat pelepasan *tooling* nilai maksimum dari von mises *stress* adalah 317 Mpa. Didapat nilai von mises *stress* berkurang setelah dilakukan pelepasan *tooling*. Hal ini menunjukkan bahwa setelah setelah dilakukan pelepasan *tooling* internal *stress* yang ada pada *tube* akan berkurang. Daerah yang berwarna merah juga berbeda antara kondisi sebelum pelepasan *tooling* dan sesudah pelepasan *tooling*.

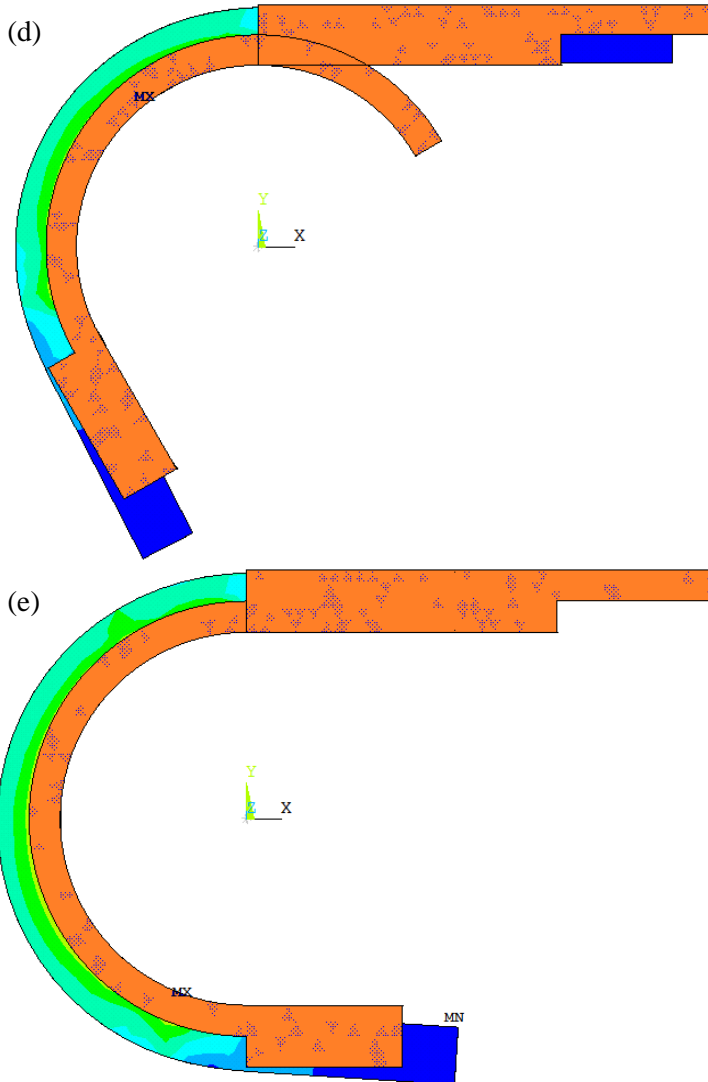
4.2 Pengaruh sudut *bending* terhadap *springback*

4.2.1 *Tube* 40 x 40 mm

Gambar hasil simulasi pada *tube* 40x40 mm dapat dilihat pada gambar 4.21 dibawah ini:



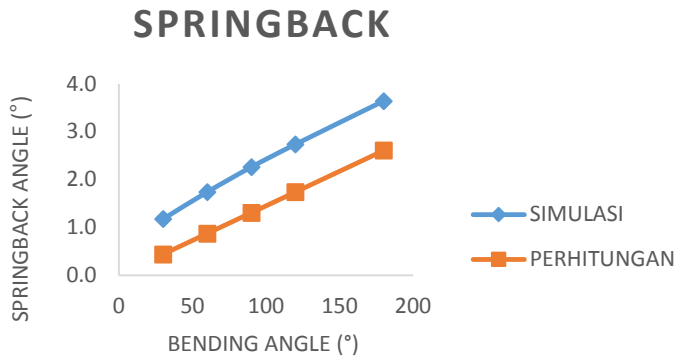




Gambar 4.21 *springback* pada tube 40 x 40 mm dengan berbagai sudut *bending*: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat



Simulasi untuk mencari pengaruh sudut *bending* pada *tube* 40x40 mm ini dilakukan dengan menggunakan internal pressure 5 Mpa untuk mengganti penggunaan mandrel agar tidak terjadi wrinkling dan flattening.



Gambar 4.22 Pengaruh sudut *bending* terhadap *springback*

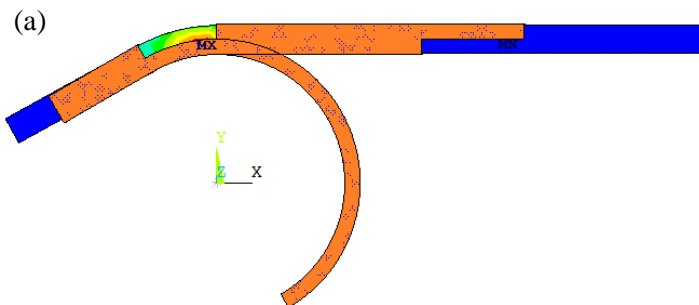
Besarnya derajat *springback* yang terjadi pada *tube* AISI 304L dengan ukuran 40x 40 mm terhadap sudut *bending* dapat dilihat pada gambar 4.22 diatas. Pada gambar 4.22 diatas disajikan perbandingan sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang terjadi. Pada gambar juga disajikan data yang diperoleh dari perhitungan yang ada pada bab 2. Dapat dilihat bahwa sudut *springback* paling kecil terjadi ketika sudut *bending* juga kecil. Pada sudut *bending* 30 pada simulasi diperoleh sudut *springback* sekitar 1.2 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat nilai *springback* pada simulasi mencapai 3.6 derajat. Begitu juga pada perhitungan, sudut *springback* terkecil terjadi pada sudut *bending* 30 derajat, yaitu sekitar 0.4 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut

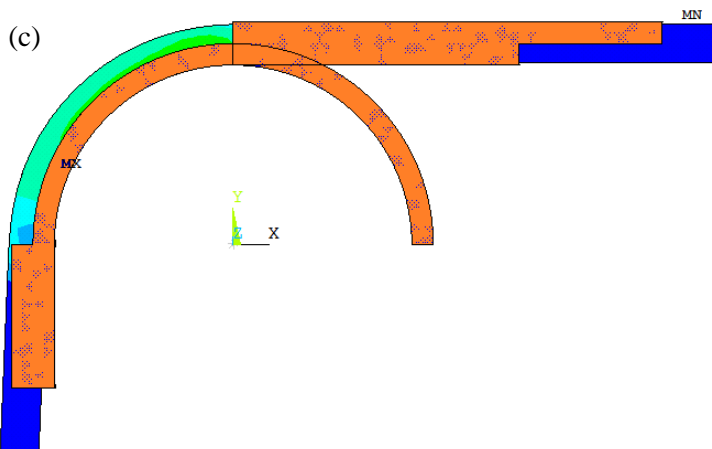
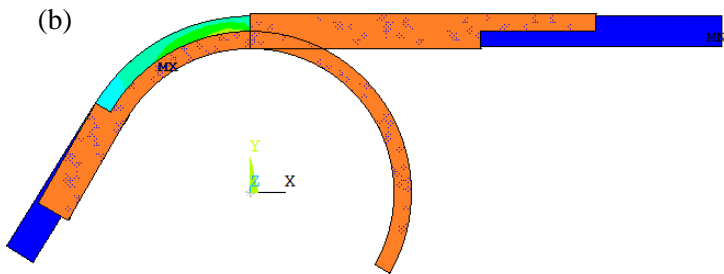


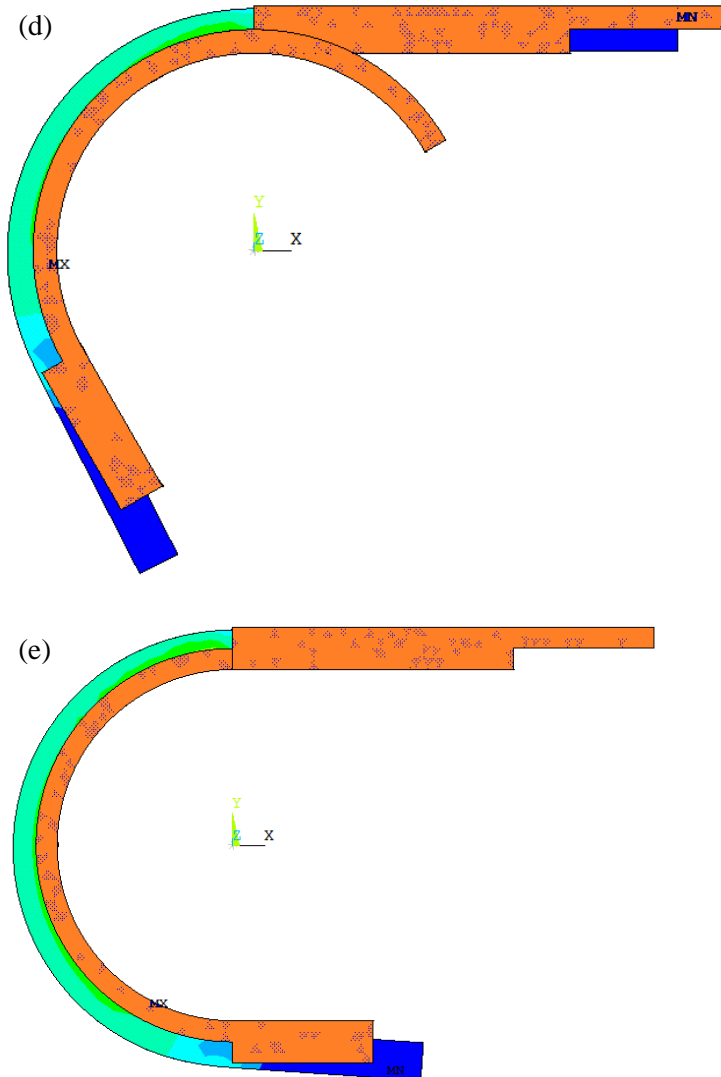
bending 180 derajat dengan nilai *springback* 2.6 derajat. Dapat dilihat bahwa Antara hasil simulasi dengan nilai perhitungan memiliki tren yang sama yaitu *springback* meningkat seiring bertambahnya *bending angle* dan meningkatnya terjadi secara linear. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga bahwa nilai sudut *sptingback* yang diperoleh melalui metode perhitungan berada dibawah nilai sudut *springback* yang diperoleh dengan cara simulasi. Hal ini salah satunya dikarenakan pengaruh gaya gesek yang tidak dimasukkan dalam perhitungan, dimana menurut vaxjo(2012), mandrel dan gaya gesek akan menambah nilai momen *bending* yang akan menyebabkan bertambahnya sudut *springback* yang dapat berkisar Antara 25-200%. Pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang bersifat linear ini sesuai dengan persamaan pada bab 2 dan juga sesuai dengan jurnal dari Li, et al(2012) yang menyatakan bahwa pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* terjadi secara linear.

4.2.2 Tube 40x30 mm

Gambar hasil simulasi pada *tube* 40x30 mm dapat dilihat pada gambar 4.23 dibawah ini:





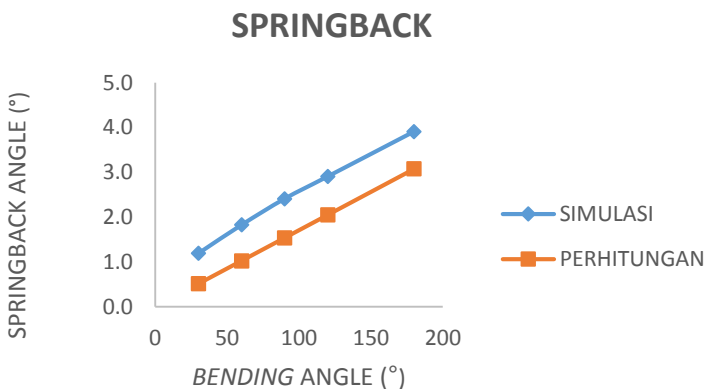


Gambar 4.23 *springback* pada tube 40 x 30 mm dengan berbagai sudut *bending*: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat



Simulasi untuk mencari pengaruh sudut *bending* pada *tube* 40x30 mm ini dilakukan dengan menggunakan internal pressure 5 Mpa untuk mengganti penggunaan mandrel agar tidak terjadi wrinkling dan flattening.

Besarnya derajat *springback* yang terjadi pada *tube* AISI 304L dengan ukuran 40x30 mm terhadap sudut *bending* dapat dilihat pada gambar 4.24 dibawah ini:



Gambar 4.24 Pengaruh sudut *bending* terhadap *springback*

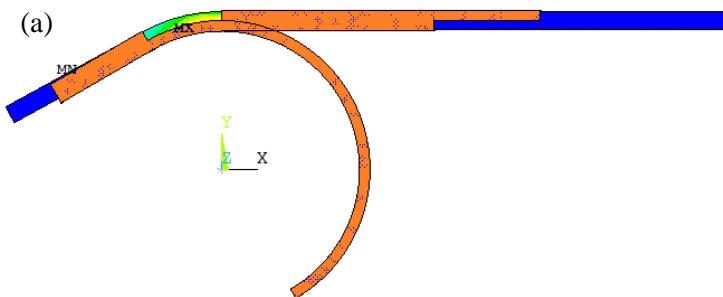
Pada gambar 4.24 diatas disajikan perbandingan sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang terjadi. Pada gambar juga disajikan data yang diperoleh dari perhitungan yang ada pada bab 2. Dapat dilihat bahwa sudut *springback* paling kecil terjadi ketika sudut *bending* juga kecil. Pada sudut *bending* 30 pada simulasi diperoleh sudut *springback* sekitar 1.2 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat nilai *springback* pada simulasi mencapai 3.9 derajat. Begitu juga pada

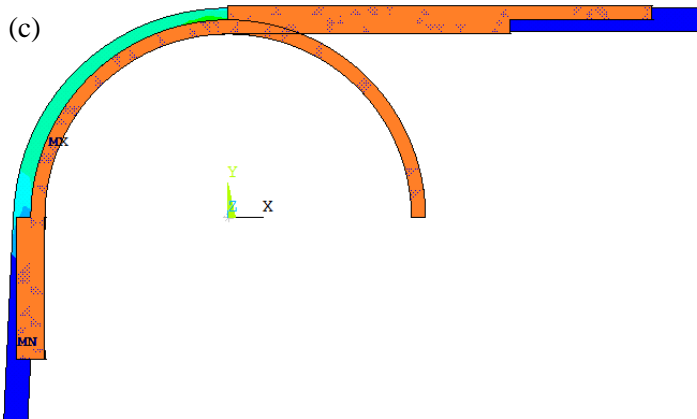
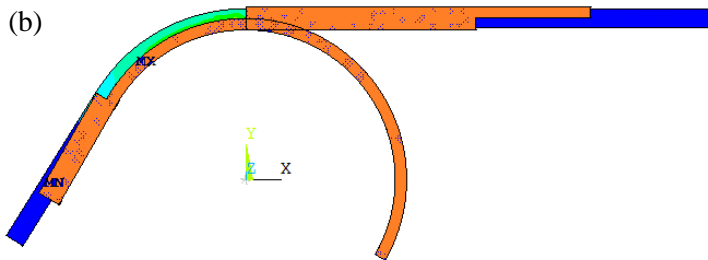


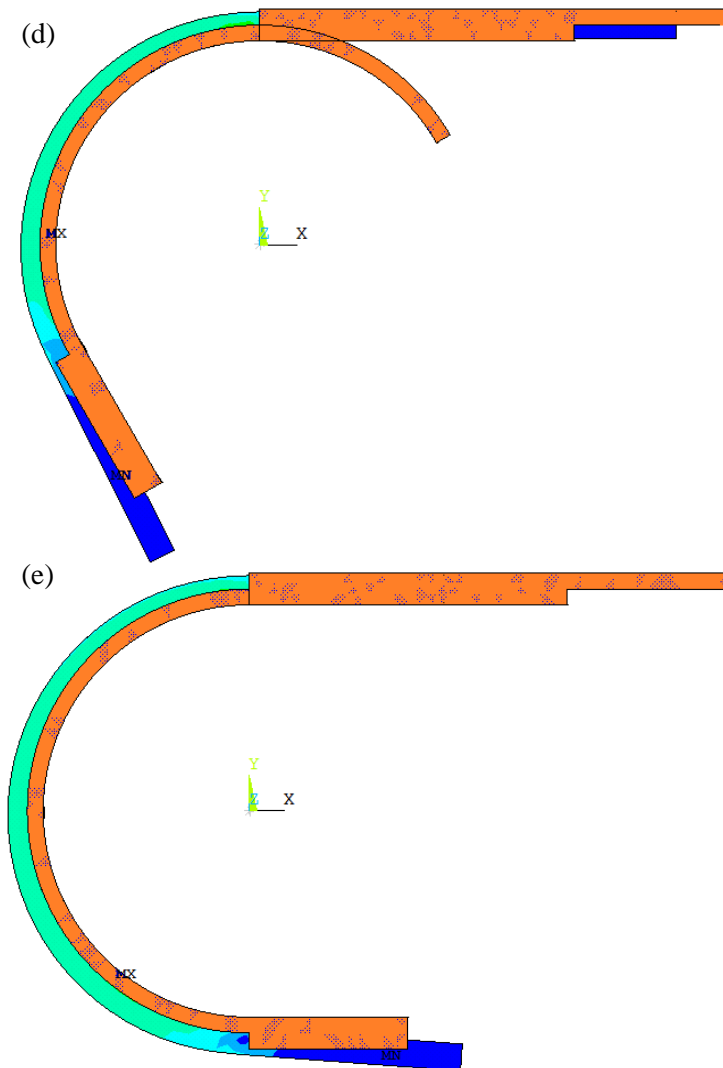
perhitungan, sudut *springback* terkecil terjadi pada sudut *bending* 30 derajat, yaitu sekitar 0.5 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat dengan nilai *springback* 3.1 derajat. Dapat dilihat bahwa Antara hasil simulasi dengan nilai perhitungan memiliki tren yang sama yaitu *springback* meningkat seiring bertambahnya *bending* angle dan meningkatnya terjadi secara linear. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga bahwa nilai sudut *springback* yang diperoleh melalui metode perhitungan berada dibawah nilai sudut *springback* yang diperoleh dengan cara simulasi. Hal ini salah satunya dikarenakan pengaruh gaya gesek yang tidak dimasukkan dalam perhitungan, dimana menurut voxjo (2012), mandrel dan gaya gesek akan menambah nilai momen *bending* yang akan menyebabkan bertambahnya sudut *springback* yang dapat berkisar Antara 25-200%. Pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang bersifat linear ini sesuai dengan persamaan pada bab 2 dan juga sesuai dengan jurnal dari Li, et al (2012) yang menyatakan bahwa pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* terjadi secara linear.

4.2.3 Tube 40x20 mm

Gambar hasil simulasi pada *tube* 40 x 20 mm dapat dilihat pada gambar 4.25 dibawah ini:





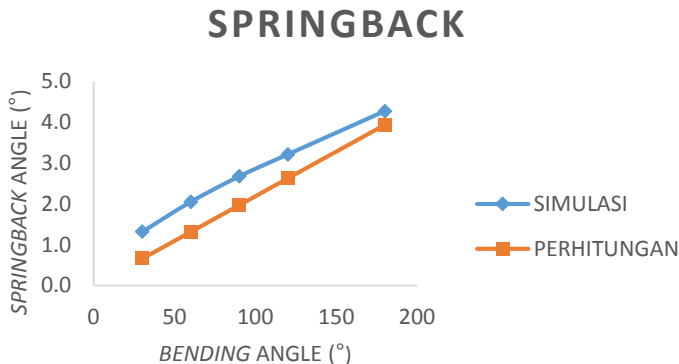


Gambar 4.25 *springback* pada tube 40 x 20 mm dengan berbagai sudut *bending*: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat



Simulasi untuk mencari pengaruh sudut *bending* pada *tube* 40x40 mm ini dilakukan dengan menggunakan internal pressure 5 Mpa untuk mengganti penggunaan mandrel agar tidak terjadi wrinkling dan flattening.

Besarnya derajat *springback* yang terjadi pada *tube* AISI 304L dengan ukuran 40x20 mm terhadap sudut *bending* dapat dilihat pada gambar 4.26 dibawah ini:



Gambar 4.26 Derajat *springback* yang terjadi terhadap derajat *bending*.

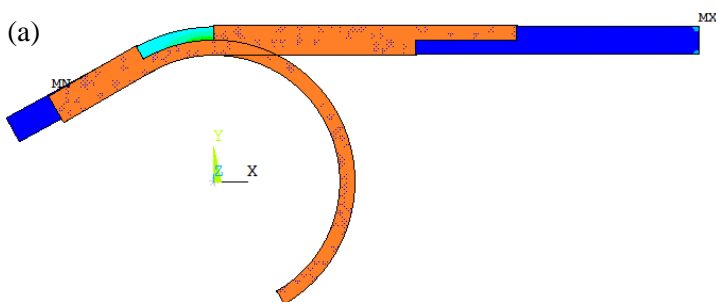
Pada gambar 4.26 diatas disajikan perbandingan sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang terjadi. Pada gambar juga disajikan data yang diperoleh dari perhitungan yang ada pada bab 2. Dapat dilihat bahwa sudut *springback* paling kecil terjadi ketika sudut *bending* juga kecil. Pada sudut *bending* 30 pada simulasi diperoleh sudut *springback* sekitar 1.3 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat nilai *springback* pada simulasi mencapai 4.3 derajat. Begitu juga pada perhitungan, sudut *springback* terkecil terjadi pada sudut *bending* 30 derajat, yaitu sekitar 0.7 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat dengan nilai

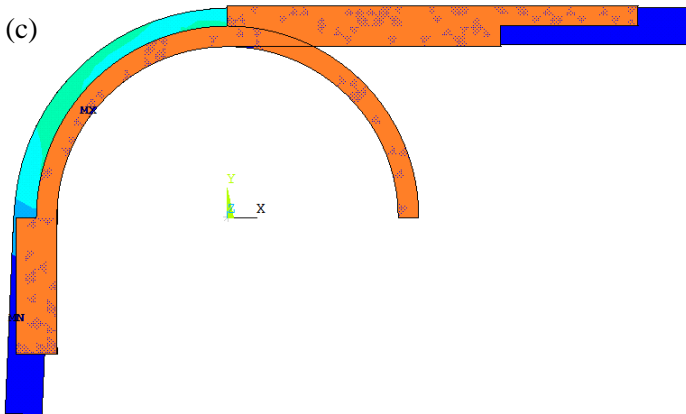
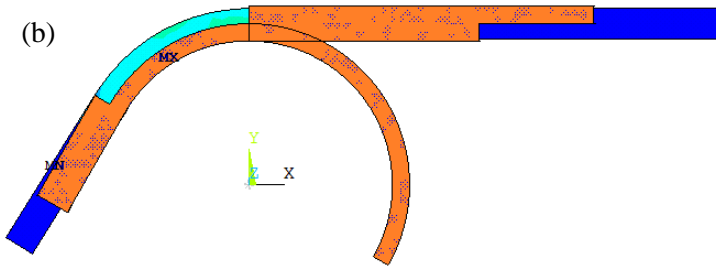


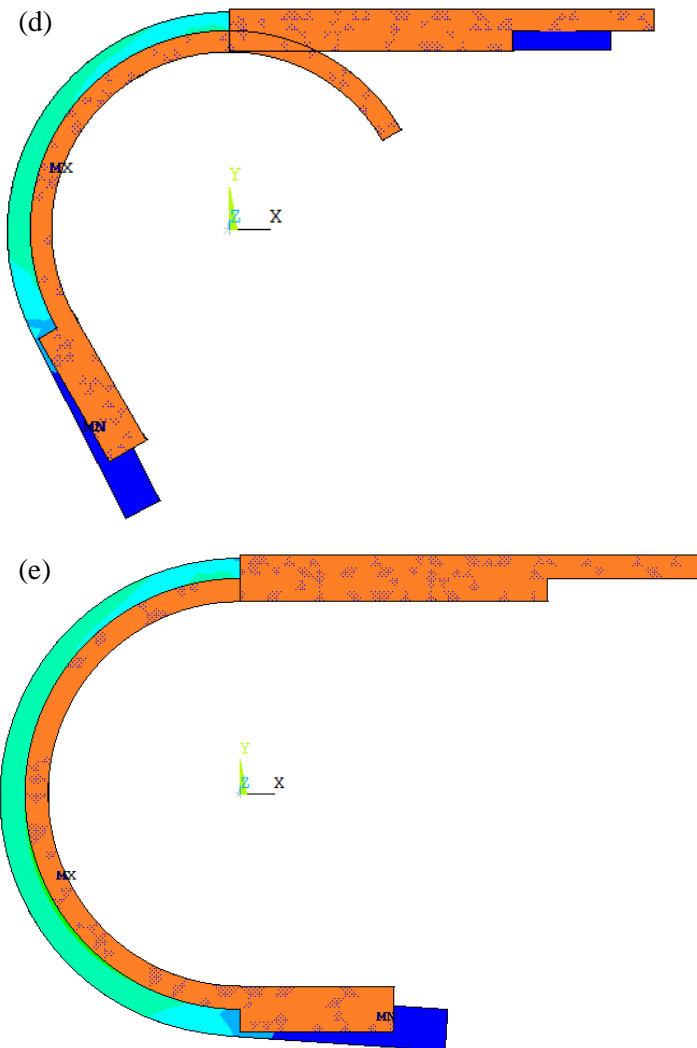
springback 3.9 derajat. Dapat dilihat bahwa Antara hasil simulasi dengan nilai perhitungan memiliki tren yang sama yaitu *springback* meningkat seiring bertambahnya *bending angle* dan meningkatnya terjadi secara linear. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga bahwa nilai sudut *sptingback* yang diperoleh melalui metode perhitungan berada dibawah nilai sudut *springback* yang diperoleh dengan cara simulasi. Hal ini dikarenakan pada perhitungan tidak dimasukkan pengaruh gaya gesek, dimana menurut *vaxjo*(2012), *mandrel* dan gaya gesek akan menambah nilai momen *bending* yang akan menyebabkan bertambahnya sudut *springback*, yang dapat berkisar Antara 25-200%. Pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang bersifat linear ini sesuai dengan persamaan pada bab 2 dan juga sesuai dengan jurnal dari *Li, et al*(2012) yang menyatakan bahwa pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* terjadi secara linear.

4.2.4 Tube 50x30 mm

Gambar hasil simulasi pada *tube* 50x30 mm dapat dilihat pada gambar 4.27 dibawah ini:





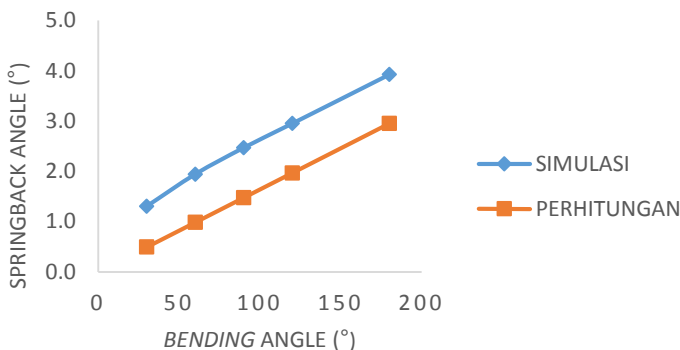


Gambar 4.27 *springback* pada tube 50 x 30 mm dengan berbagai sudut *bending*: (a) 30 derajat (b) 60 derajat (c) 90 derajat (d) 120 derajat (e) 180 derajat



Simulasi untuk mencari pengaruh sudut *bending* pada *tube* 50x30 mm ini dilakukan dengan menggunakan internal pressure 5 Mpa untuk mengganti penggunaan mandrel agar tidak terjadi wrinkling dan flattening. Besarnya derajat *springback* yang terjadi pada *tube* AISI 304L dengan ukuran 50 x 30 mm terhadap sudut *bending* dapat dilihat pada gambar 4.28 dibawah ini:

SPRINGBACK



Gambar 4.28 Pengaruh sudut *bending* terhadap *springback*

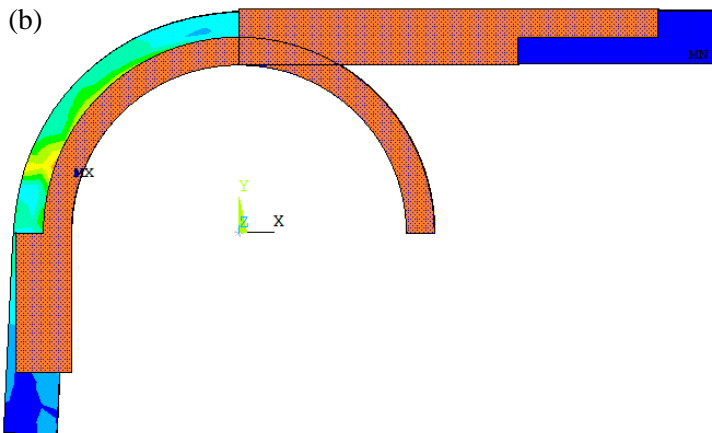
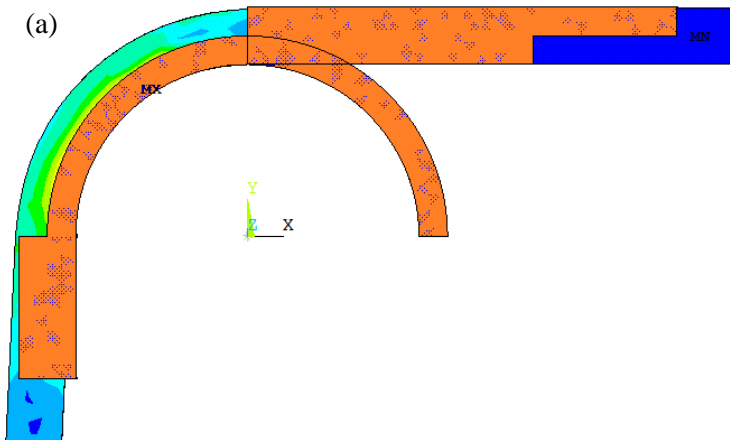
Pada gambar 4.28 diatas disajikan perbandingan sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang terjadi. Pada gambar juga disajikan data yang diperoleh dari perhitungan yang ada pada bab 2. Dapat dilihat bahwa sudut *springback* paling kecil terjadi ketika sudut *bending* juga kecil. Pada sudut *bending* 30 pada simulasi diperoleh sudut *springback* sekitar 1.3 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat nilai *springback* pada simulasi mencapai 3.9 derajat. Begitu juga pada perhitungan, sudut *springback* terkecil terjadi pada sudut *bending* 30 derajat, yaitu sekitar 0.5 derajat dan terus meningkat secara linear hingga pada sudut *bending* 180 derajat dengan nilai *springback* 2.9 derajat. Dapat dilihat bahwa Antara hasil simulasi dengan nilai perhitungan memiliki tren yang sama yaitu *springback*

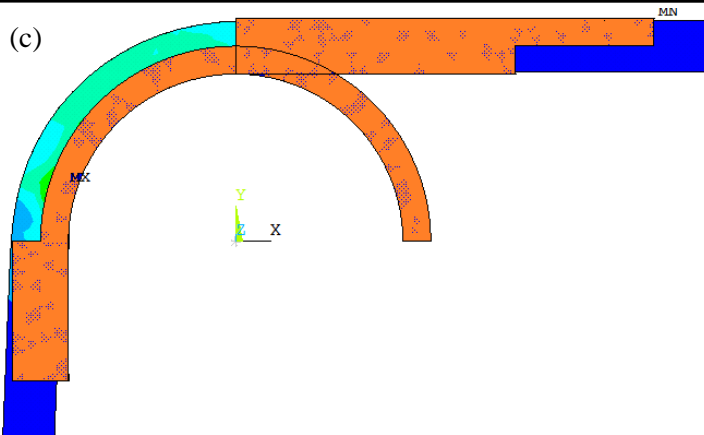


meningkat seiring bertambahnya *bending* angle dan meningkatnya terjadi secara linear. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga bahwa nilai sudut *springback* yang diperoleh melalui metode perhitungan berada dibawah nilai sudut *springback* yang diperoleh dengan cara simulasi. Hal ini dikarenakan pada perhitungan tidak dimasukkan pengaruh gaya gesek, dimana menurut voxjo (2012), mandrel dan gaya gesek akan menambah nilai momen *bending* yang akan menyebabkan bertambahnya sudut *springback*, yang dapat berkisar Antara 25-200%. Pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* yang bersifat linear ini sesuai dengan persamaan pada bab 2 dan juga sesuai dengan jurnal dari Li, et al (2012) yang menyatakan bahwa pengaruh sudut *bending* terhadap sudut *springback* terjadi secara linear.

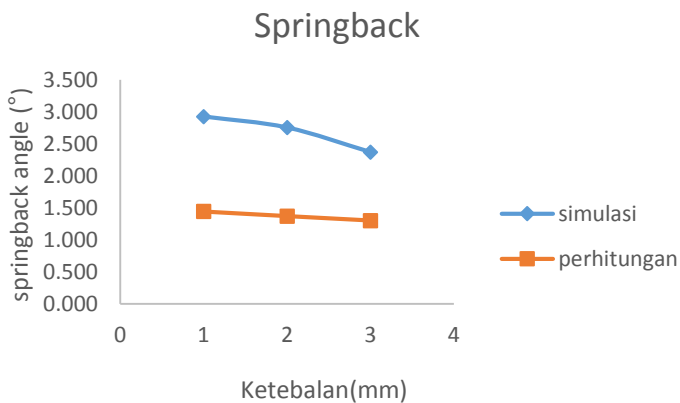
4.3 Pengaruh ketebalan tube terhadap *springback*

Pada simulasi untuk mengetahui pengaruh ketebalan tube terhadap *springback* ini digunakan tube dengan ukuran 40 x 40mm dengan sudut *bending* sebesar 90 derajat. Gambar akhir dari simulasi untuk pengaruh ketebalan tube terhadap *springback* dapat dilihat pada gambar 4.29 dibawah ini. Pada simulasi ini tidak digunakan pressure, karena dengan penggunaan pressure tidak bisa didapatkan hasil yang valid apabila ketebalan dari tube berbeda, karena pengaruh pressure terhadap *springback* akan menjadi besar ketika pressure yang digunakan sama tetapi ketebalan pada tube berbeda.





Gambar 4.29 *Springback* pada *tube* 40x40 mm dengan sudut *bending* 90 derajat dengan ketebalan: (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm



Gambar 4.30 Pengaruh ketebalan *tube* terhadap *springback*

Pada gambar 4.30 terdapat grafik pengaruh ketebalan *tube* terhadap sudut *springback*. Dapat dilihat untuk simulasi ketebalan *tube* 1 mm menghasilkan *springback* sebesar 2.9 derajat untuk



ketebalan *tube* 2 mm menghasilkan *springback* sebesar 2.8 derajat dan untuk ketebalan *tube* 3mm menghasilkan *springback* sebesar 2.4 derajat. Tren Antara hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan hasil yang sama yaitu semakin tebal *tube* maka semakin kecil sudut *springback* yang terjadi, sebaliknya semakin tipis *tube* maka sudut *springback* yang terjadi semakin besar. Hal ini disebabkan karena dengan adanya perubahan ketebalan akan menyebabkan berubahnya nilai perbandingan Antara nilai *section modulus* dengan momen inersia. Agar lebih mudah menyatakan perbandingan Antara *section modulus* dengan momen inersia, digunakan factor k yang terdapat pada persamaan 10 pada bab 2.

Tabel 4.2 pengaruh ketebalan terhadap factor k

Ketebalan (mm)	Factor k
1	3.14E+09
2	2.99E+09
3	2.84E+09

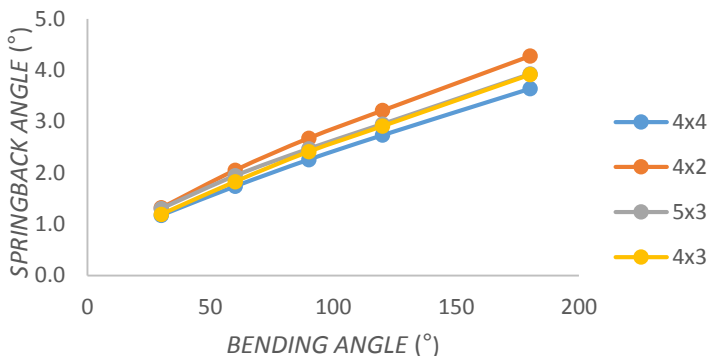
Dapat dilihat pada tabel 4.2 diatas bahwa semakin bertambahnya ketebalan akan menyebabkan faktor k semakin kecil , yang akhirnya akan menyebabkan berkurangnya sudut *springback* yang terjadi. Hal ini didukung oleh hasil simulasi oleh Sozen et.al (2012) yang menyatakan bahwa sudut *springback* akan berkurang seiring bertambahnya thickness pada *tube*.

4.4. Pengaruh ukuran penampang terhadap *springback*

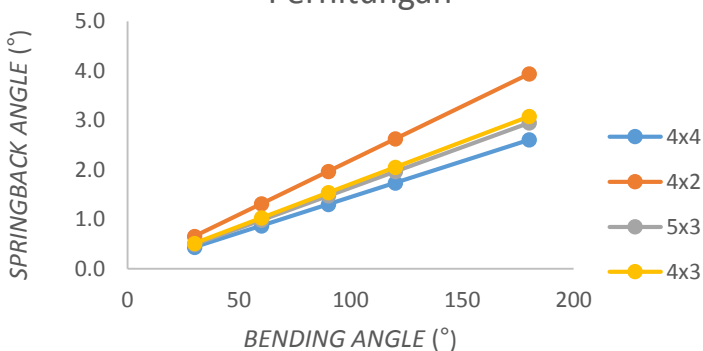
Untuk mencari tahu pengaruh ukuran penampang terhadap *springback* maka akan dibandingkan *springback* pada *case* 1 hingga *case* 25. Gambar 4.31 menunjukkan perbandingan *springback* yang terjadi Antara *case* 1 hingga 25 baik secara simulasi maupun perhitungan.



(a) Perbandingan Penampang Simulasi



(b) Perbandingan Penampang Perhitungan



Gambar 4.31 grafik pengaruh ukuran penampang terhadap *springback* secara (a) simulasi (b) perhitungan

Pada grafik sudut *springback* hasil simulasi pada gambar (a) diperoleh *tube* dengan penampang 40 x 20 mm sebagai *tube* yang memiliki sudut *springback* paling tinggi, kemudian diikuti



oleh *tube* dengan sudut *springback* 40 x 30 mm dan 50 x 30 mm dengan perbedaan sudut *springback* yang sangat kecil, kemudian *tube* dengan sudut *springback* terkecil adalah *tube* dengan penampang 40 x 40 mm. Antara hasil simulasi dan perhitungan juga memiliki tren yang sama yaitu hasil perhitungan diperoleh *tube* dengan penampang 40 x 20 mm sebagai *tube* yang memiliki sudut *springback* paling tinggi, kemudian diikuti oleh *tube* dengan sudut *springback* 40 x 30 dan 50 x 30 dengan perbedaan sudut *springback* yang sangat kecil, kemudian *tube* dengan sudut *springback* terkecil adalah *tube* dengan penampang 40 x 40 mm. Hal ini disebabkan karena dengan adanya perubahan penampang akan menyebabkan berubahnya nilai perbandingan Antara nilai *section modulus* dengan momen inersia. Agar lebih mudah menyatakan perbandingan Antara *section modulus* dengan momen inersia, digunakan faktor k yang terdapat pada persamaan 10 pada bab 2.

Tabel 4.3 pengaruh ukuran penampang terhadap factor k

Ukuran penampang (mm)	Factor k
40 x 40	2.84E+09
40 x 30	3.35E+09
40 x 20	4.29E+09
50 x 30	3.21E+09

Pada table 4.3 diatas dapat dilihat bahwa nilai factor k terbesar dimiliki oleh *tube* dengan penampang 40 x 20 mm kemudian disusul oleh *tube* 40 x 30 mm , kemudian *tube* 50 x 30 mm dan terakhir *tube* 40 x 40 mm. semakin kecil faktor k maka sudut *springback* yang dihasilkan akan semakin kecil dan berlaku juga sebaliknya. Sehingga nilai faktor k ini sesuai dengan simulasi dan perhitungan yang ada.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil yang didapat dari hasil percobaan simulasi adalah:

1. Semakin besar sudut bending maka sudut springback akan semakin besar, sebaliknya semakin kecil sudut bending maka sudut *springback* akan semakin kecil.

2. Semakin bertambahnya ketebalan *tube* maka sudut *springback* akan semakin kecil, semakin berkurang ketebalan *tube* maka sudut *springback* akan semakin besar.

3. Pengaruh ukuran Penampang tube terhadap sudut springback dipengaruhi oleh factor k, apabila factor k semakin besar maka sudut springback semakin besar, apabila factor k semakin kecil maka sudut springback semakin kecil

5.2 Saran

Saran untuk penelitian ini adalah

1. Untuk meningkatkan akurasi dalam permodelan *rotary draw bending* dapat dimodelkan *mandrel*.

2. Pengaturan *meshing* dapat digunakan ukuran yang lebih *fine* agar dapat menghasilkan hasil yang semakin akurat.

3. Dapat ditambahkan hasil eksperimental untuk memperkuat validasi dari permodelan.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Sözen. et al. 2012. *Investigation and prediction of springback in rotary-draw tube bending process using finite element method*. Ankara: TOBB University of Economics and Technology.
- Li, K.P., W.P. Carden, dan R.H. Wagoner. 2002. *Simulation of springback*. Columbus: The Ohio State University.
- Miller, Gregory. 2003. *Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide*. Society of Manufacturing Engineers.
- Rajpal, J. et al. 2013. *Finite Element Analysis and Mathematical Calculation of Spring Back in Rotary Draw Tube Bending*. Pune: MIT College of Engineering.
- Zhan, et al. 2006. *Springback analysis of numerical control bending of thin-walled tube using numerical-analytic method*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Zhao. et al. 2009. *Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Xue. et al. 2014. *Twist springback of asymmetric thin-walled tube in mandrel rotary draw bending process*. Aveiro: University of Aveiro.
- Sozen. Et al. 2012. *Prediction of Springback in CNC Tube Bending Process Based on Forming Parameters* Ankara: TOBB University of Economics and Technology.
- Li. Et al 2012. *Geometry-Dependent springback behaviors of thin walled tube upon cold bending* China: Northwestern Polytechnical University.
- Vaxjo 2012. *Capacity Calculator for Rotary Draw Bending* Turkey: Linneaus University.
- Gu, R.J., H. Yang, M. Zhan, H. Li, H.W. Li. 2007. *Research on the Springback of thin-walled NC bending based on the*

- numerical simulation of the whole process*. Computation Materials Science
- Murata, M., T. Kuboki, K. Takahashi, M. Goodarzi, Y. Jin. 2008. ***Effect of Hardening Exponent on Tube Bending***. Journal of Materials Processing Technology
- Paulsen, Frode, Torgeir Welo. 1996. ***Application of Numerical Simulation in the Bending of Aluminium-Alloy Profiles***. Journal of Materials Processing Technology
- Yang. Et al. 2010. ***Friction role in bending behaviors of thin walled tube in rotary draw bending under small bending radii***. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Howard. E., Timothy L. 1990 ***Metals Handbook***. ASM International Handbook Comitee

LAMPIRAN

Berikut adalah command dari proses simulasi Rotary Draw Bending beserta Springback yang menjadi acuan untuk case selanjutnya.

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,LSDYNA,0
/GO
/PREP7
ET,1,SHELL181
KEYOPT,1,8,2
R,1,0.003,0.003,0.003,0.003, , !pipe thickness t=3 mm
MP,EX,1,196E9
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7850
TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,210E6,149.36E7,,,
k,1,0,0,0
k,2,0,-0.14,0.02
k,3,0,-0.14,-0.02
k,4,0,-0.12,0.02
k,5,0,-0.12,-0.02
k,6,0.14,0,0.02
k,7,0.14,0,-0.02
k,8,0.12,0,0.02
k,9,0.12,0,-0.02
k,10,0,0.14,-0.02
```

k,11,0,0.14,0.02
k,12,0,0.12,0.02
k,13,0,0.12,-0.02
k,14,0,0.16,0.02
k,15,0,0.16,-0.02
k,16,-0.1,0.16,0.02
k,17,-0.1,0.16,-0.02
k,18,-0.1,0.12,-0.02
k,19,-0.1,0.12,0.02
k,20,0,0,0.02
k,21,0,0,-0.02
KBETW,16,19,0,RATI,0.5,
KBETW,17,18,0,RATI,0.5,
larc,4,8,20,0.12
larc,8,12,20,0.12
larc,5,9,21,0.12
larc,9,13,21,0.12
larc,2,6,20,0.14
larc,6,11,20,0.14
larc,3,7,21,0.14
larc,7,10,21,0.14
lstr,2,4
lstr,3,5
lstr,4,5
lstr,6,8
lstr,7,9
lstr,11,12
lstr,10,13
lstr,3,5
lstr,4,5
lstr,6,8
lstr,7,9
lstr,11,12
lstr,12,13
lstr,11,14

lstr,10,15
 lstr,14,15
 lstr,12,19
 lstr,13,18
 lstr,18,19
 lstr,19,22
 lstr,18,23
 lstr,16,22
 lstr,17,23
 lstr,16,17
 lstr,14,16
 lstr,15,17
 lstr,11,22
 lstr,10,23
 lstr,8,9
 k,24,0,0.12,0.02
 k,25,0,0.12,-0.02
 k,26,0,0.16,0.02
 k,27,0,0.16,-0.02
 k,28,0.2,0.12,0.02
 k,29,0.2,0.12,-0.02
 k,30,0.3,0.16,0.02
 k,31,0.3,0.16,-0.02
 k,32,0.2,0.14,0.02
 k,33,0.2,0.14,-0.02
 k,34,0.3,0.14,0.02
 k,35,0.3,0.14,-0.02
 LSTR, 24, 28
 LSTR, 28, 32
 LSTR, 32, 34
 LSTR, 34, 30
 LSTR, 30, 26
 LSTR, 26, 24
 LSTR, 25, 29
 LSTR, 29, 33

LSTR, 33, 35
 LSTR, 35, 31
 LSTR, 31, 27
 LSTR, 27, 25
 LSTR, 26, 27
 LSTR, 24, 25
 LSTR, 28, 29
 LSTR, 30, 31
 AL,19,29,27,28
 AL,16,21,22,20
 AL,14,30,23,20
 AL,17,28,25,30
 AL,15,31,24,21
 AL,18,29,26,31
 AL,9,5,12,1
 AL,12,6,14,2
 AL,7,13,3,10
 AL,13,8,15,4
 AL,1,32,3,11
 AL,2,32,4,16
 AL,33,34,35,36,37,38
 AL,39,40,41,42,43,44
 AL,33,47,39,46
 AL,37,48,43,45
 k,36,-0.15,0.1215,0.0185
 k,37,-0.15,0.1215,-0.0185
 k,38,-0.15,0.1585,0.0185
 k,39,-0.15,0.1585,-0.0185
 k,40,0.550,0.1215,0.0185
 k,41,0.550,0.1215,-0.0185
 k,42,0.550,0.1585,0.0185
 k,43,0.550,0.1585,-0.0185
 LSTR,36,40
 LSTR,40,42
 LSTR,42,38

LSTR,38,36
 LSTR,37,41
 LSTR,41,43
 LSTR,43,39
 LSTR,39,37
 LSTR,36,40
 LSTR,40,41
 LSTR,41,37
 LSTR,37,36
 LSTR,38,42
 LSTR,42,43
 LSTR,43,39
 LSTR,39,38
 AL,49,50,51,52
 AL,53,54,55,56
 AL,49,57,53,58
 AL,51,59,55,60
 NUMCMP,AREA
 NUMCMP,LINE
 NUMCMP,KP
 ASEL,S,,,17,20,1,
 TYPE, 1
 MAT, 1
 REAL, 1
 ESYS, 0
 SECNUM,
 !*
 SMRT,1
 MSHAPE,1,2D
 MSHKEY,0
 AMESH,ALL
 !ASEL,S,,,17,20,1,
 !AREFINE,ALL, , ,1,0,1,1
 !ALLSEL,ALL
 ASEL,S, , ,18,20,1,

```

ESLA,S
ENSYM, , , ,ALL, !reversing normal
ALLSEL,ALL
APLOT
!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.2
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,0.1,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,0

```

```

KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,8
ASEL,A,,,9
ASEL,A,,,10
ASEL,A,,,11
ASEL,A,,,12
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Create a pilot node
N,5000,0,0,0
TSHAP,PILO
E,5000
NSEL,S,,,5000
CM,a,NODE
CMSEL,S,_NODECM
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,17
ASEL,A,,,18
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,20
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0

```

```

NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
! Reverse target normals
FLST,5,6,5,ORDE,5
FITEM,5,1
FITEM,5,4
FITEM,5,-5
FITEM,5,10
FITEM,5,-12
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y

```

```

CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*

```

```

CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN
ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
!*
!*

```



```

CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.2
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
R,4,,,0.1,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,5,4,0
KEYOPT,5,5,1
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,0
KEYOPT,5,12,0
KEYOPT,5,2,0
KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15

```

```

ASEL,A,,,16
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,4,4,-1
TYPE,4
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,17
ASEL,A,,,18
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,20
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,4
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPlot
! Reverse target normals
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 13
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1

```

```

ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM

```

```

CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
FINISH
/SOL
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,5000
!*
/GO
D,P51X, ,3.14159, , , ,ROTZ, , , ,
!60=1.0472;90=1.5708;120=2.0944;180=3.14159
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,100,1000,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,100
FINISH
/PREP7
KEYOPT,3,11,1
KEYOPT,5,11,1
/MREP,EPLT
FINISH
/SOL
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,17
FITEM,2,-20
/GO
!*
SFA,P51X,1,PRES,5E6
/STATUS,SOLU

```

SOLVE

!*

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua saya yang telah memberikan doa, semangat dan nasihat yang sangat bermanfaat.
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D, Tubagus Noor R, S.T., M.Sc, dan Ir. Rochman Rochiem, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, fasilitas dan motivasi
3. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Teman-teman Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 dan keluarga MT 14 yang telah memberikan dukungan dan saran. Juga Veteran MT 14, sebagai saudara seperjuangan.
5. Teman-teman kontrakan saya yang sudah memberi dukungan dan hiburan disaat saya kurang motivasi.
6. Kota Surabaya, Mas dan Mbak, dan orang-orang luar biasa yang saya temui di Surabaya, yang telah menemani, memberikan cerita dan menjadi panutan pengalaman selama saya tinggal di Surabaya; serta
7. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

BIODATA PENULIS



Penulis yang akrab dipanggil Rio ini bernama lengkap Caesaris Isak Cornelis. Ia dilahirkan di Jakarta pada tahun 1994 silam. Penulis merupakan anak tunggal dan telah menempuh pendidikan formal, yaitu SD Gembala Baik pontianak , SMP Gembala Baik pontianak , dan SMA Gonzaga jakarta . Setelah itu, penulis melanjutkan studinya ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012 di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan nomor registrasi pokok 2712 100 108. Semasa kuliah, penulis terdaftar aktif sebagai anggota Senat mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi dari tahun 2013 hingga 2015 .Penulis mengambil tugas akhirnya di bidang analisa numerik dan modelling di laboratorium komputasi dan pemodelan material.

Selesaiannya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di kampus tercintanya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Email : caesarisak@gmail.com